INVESTIGACION y CIENCIA

YACIMIENTOS SUBTERRANEOS DE AGUA EN ESPAÑA

SISTEMA INMUNITARIO DEL CEREBRO

BASES CIENTIFICAS DE LOS TRUCOS MALABARES

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CRISTALES CON MEMORIA



ENERO 1996
800 PTAS.



Enero de 1996 Número 232

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

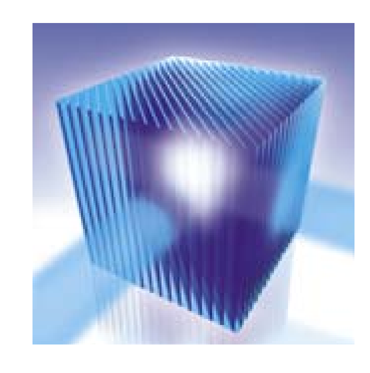
Asesoramiento y traducción:

Mónica Murphy: *La misión* Galileo; Esteban Santiago: *El sistema inmunitario del cerebro*; Manuel Puigcerver: *Clima caótico*; Luis Bou: *Memorias holográficas*, *La ciencia del malabarismo* y *Juegos matemáticos*; Carlos Castrodeza: *¿Tiene sentido la vida fuera de sí misma?*; Juan Pedro Campos: *El descubrimiento de los rayos X* y *Apuntes*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Slim Films

Página	Fuente
6-7	Composición digital de Slim Films; fotografía de Io cortesía de Laboratorio de Propulsión a Chorro
8	Jared Schneidman JSD
9	Jared Schneidman JSD (*arriba*); Lab. de Propulsión a Chorro (*abajo*)
10-11	Lab. de Propulsión a Chorro (*fotos*); Laurie Grace (*grafismo*)
12-13	Laboratorio de Propulsión a Chorro
16-17	Dana Burns-Pizer
18	Dana Burns-Pizer (*dibujos*); Wolfgang J. Streit (*micrografías*)
20	Cortesía de William Feindel, Archivo Penfield
21	Haruhiko Akiyama, Instituto de Psiquiatría de Tokio
22-23	Barry Ross
24	Jana Brenning (*arriba, derecha*); Barry Ross
25	Jana Brenning
26-27	Jana Brenning (*arriba, izquierda*); Richard B. Alley, Universidad Estatal de Pennsylvania
28	Norman Tomalin, Bruce Coleman Inc. (*arriba, izquierda*); Stefan Lundgren, The Wildlands Collection (*arriba, derecha*); Fridmar Damm, *Leo de Wys* (*abajo, izquierda*); Boris Dmitriev (*abajo, derecha*)
42-43	Charles O'rear
44-45	Jared Schneidman JSD
46-47	Instituto de Tecnología de California; Eric Sander (*derecha*)
48	Eric Sander
51-55	Antonio Pulido Bosch
56	W. Martín Rosales
58-59	Hans Reinhard, Bruce Coleman Inc. (*guepardo*); Video Surgery, Photo Researchers, Inc. (*hueso*); Ken Eward, BioGrafx, Science Source, Photo Researchers, Inc. (*ADN*); composición digital por Tom Draper
60	Gregory G. Dimijian, Photo Researchers, Inc. (*arriba*); Pat Greany, USDA (*abajo, izda.*); Scott Nielsen, Bruce Coleman, Inc. (*abajo, dcha.*)
61	Norbert Wu (*izquierda*); David Madison, Bruce Coleman, Inc. (*dcha.*)
62	Archivo Bettmann (*arriba*); E. R. Degginger, *Animals, animals* (*abajo*)
65	German Museum Photo Library
66-67	German Museum Photo Library (*arriba, izda.*); 100 Jahre Röntgenstrahlen: 1895-1995, catálogo de exposición de la Universidad de Würzburg, 1995
68	Cortesía del Museo de la Ciencia de Londres
69	Spektrum der Wissenschaft
70	Graham Farmelo
73	Ken Regan, Camera 5; cortesía de Dubé Juggling Equipment
74	Ken Regan, Camera 5; cortesía de Dubé Juggling Equipment (*arriba*), Rediseño de Bildatlas sum Sport im Alten Ägypten por W. Decker (*abajo*)
75	Carey Ballard (*arriba*); Karl Gude (*abajo*)
77	Johnny Johnson
78	David Koether (*abajo*)
79	Ken Regan, Camera 5
86	Kathy Konkle
87	Johnny Johnson (*arriba*)
88-89	Michael Goodman



LA PORTADA muestra la pauta de refractividad variable que representa un bit de datos, volumétricamente almacenado en un cristal. Se crean tales hologramas cuando dos haces de láser, en uno de los cuales están inscritos los datos, concurren en el seno del cristal, interfiriéndose. La verdad es que la pauta de interferencia no puede verse. Cuando el cristal vuelve a iluminarse, la pauta difracta la luz y se reconstruye el haz portador de datos (*véase* "Memorias holográficas," por Demetri Psaltis y Fai Mok, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El nuevo fototubo multiplicador, llamado orticón de imagen, capta escenas bajo la luz de una vela o de una cerilla e incluso es capaz de generar una imagen de una habitación con las luces apagadas. Hasta ahora, el orticón de imagen se ha mantenido como secreto militar, pero ya en 1940 se hicieron demostraciones felices de guiado de aeronaves sin piloto con un avión torpedero controlado por radio y dirigido por televisión desde una distancia de diez millas.»

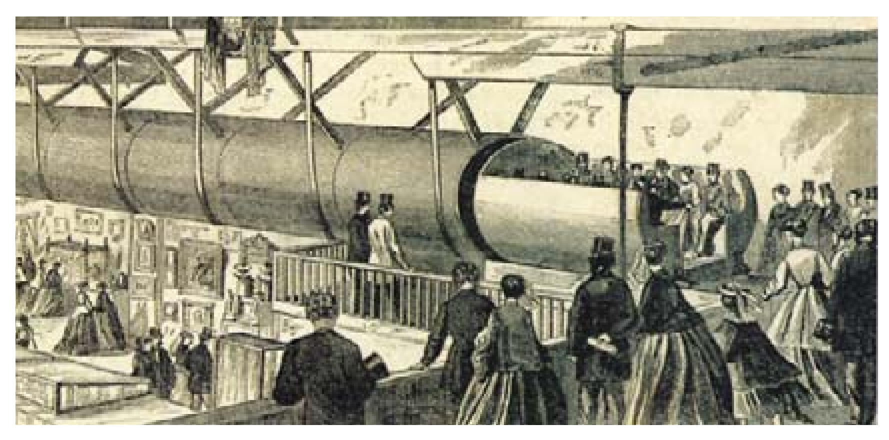
«Hacía tiempo que las fracciones de gasolina de bajo número de octanos venían siendo un problema para las refinerías. Hasta que los investigadores descubrieron que el óxido de molibdeno, cuando se dispersa en alúmina y se emplea como catalizador en una atmósfera de hidrógeno, altera la estructura molecular de las gasolinas de bajo poder calorífico. Este proceso, "hydroforming", multiplica por dos el octanaje de las gasolinas de baja calidad y, durante la guerra, aseguró el suministro de grandes cantidades de gasolina de alto octanaje a nuestros aviones y a los de nuestros aliados, una gasolina muy superior a cualquiera de las que usara el enemigo, y a un costo razonable.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «No pocos de nuestros lectores ya se habrán hecho cargo de lo que supone la muerte de Mr. Alfred Ely Beach, inventor, ingeniero y redactor de esta revista. Mostramos en la ilustración uno de sus numerosos inventos, el sistema neumático aplicado a un ferrocarril elevado. Los visitantes de la Feria del Instituto Americano, celebrada en Nueva York en 1867, recordarán el ferrocarril que colgaba del techo y corría desde la calle 14 a la 15.»

«N. A. Langley ha logrado obtener helio perfectamente libre de nitrógeno, argón e hidrógeno. Este gas demuestra ser exactamente dos veces más pesado que el hidrógeno, el patrón habitual. Guiándose por consideraciones puramente físicas, el experimentador llegó a la conclusión de que la molécula de helio contiene un solo átomo. De ahí que su peso atómico debe tomarse como 4.»

«En una reunión especial del Instituto Antropológico, celebrada en Londres, el doctor Eugene Dubois, de Holanda, leyó un informe en el que describía sus exploraciones en Java y ofrecía una demostración de los interesantes restos fósiles por él descubiertos durante sus seis años de residencia. La mayor atracción la ofrecieron los restos de un fémur de linaje humano, un esqueleto antropoide y dos molares hallados en un estrato pliocénico a orillas de un río javanés. Sostiene que conforman la prueba de más peso hasta la fecha aducida a favor de la doctrina de una evolución del hombre pareja a la de los simios a partir de un progenitor común; afirma que revelan una forma de transición entre el hombre y un simio antropoide, al que ha dado el nombre de *Pithecanthropus erectus*.»



Ferrocarril neumático de Alfred Ely Beach

«En poco tiempo la cocaína ha empezado a emplearse como estimulante en las hipódromos. Antes de la salida, o pocos momentos antes, a los caballos agotados o exhaustos se les inyectan por vía cutánea de seis a diez decigramos de cocaína. A los efectos, muy notables, les sigue un auténtico delirio muscular, en el que el caballo exhibe una velocidad desusada. El efecto de la cocaína se va haciendo menos duradero a medida que se aumenta su uso y puede que los corredores inyecten, en secreto, un segunda dosis estando en la silla. A veces el caballo entra en delirio, se torna indomeñable y abandona la pista en un arrebato frenético.»

...ciento cincuenta años

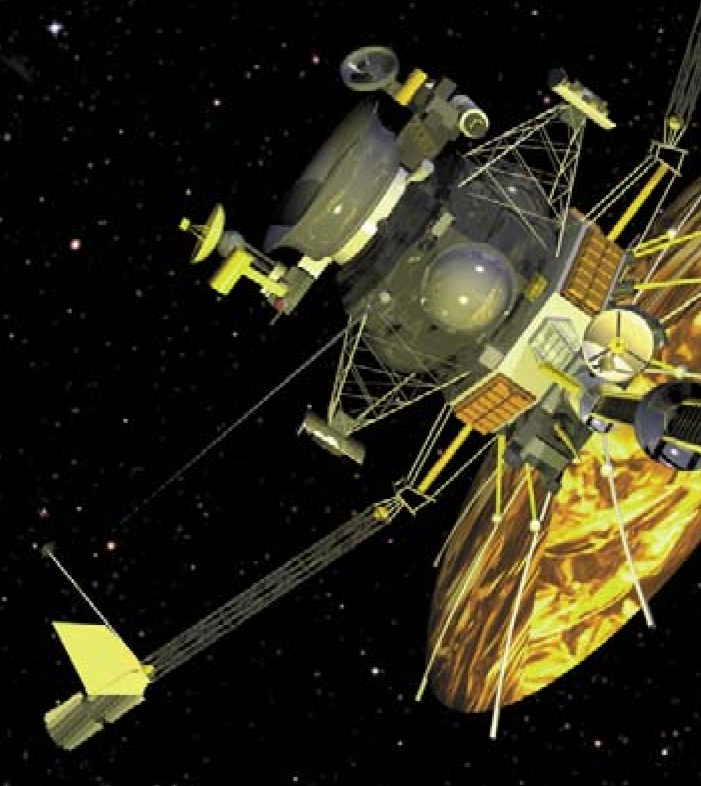
SCIENTIFIC AMERICAN: «En Oxford (Massachusetts) se requirió recientemente el concurso de una nueva aplicación de la hipnosis. La primavera pasada un granero fue pasto del fuego y ello se creía obra de un incendiario. Hace pocas semanas se empleó un hipnotizador reconocido para dormir a una persona, de la que se extrajo una información que llevó al arresto de la misma, hoy en prisión en espera de juicio. Si, a resultas del relato hipnótico, fuese declarada culpable, los bribones podrían temer a partir de ahora al hipnotismo; y si esa práctica tiene éxito, ya no habría manera de ocultar los delitos, ni de escapar a su descubrimiento.»

«Es bien sabido que una lente convexa hecha de hielo hace que los rayos solares converjan y produzcan calor. Por tanto, podría deducirse que si una gran pastilla de hielo (de cinco o seis metros de diámetro, por ejemplo) se redujera a la forma convexa (lo que podría hacerse fácilmente con una azuela de carpintero) y se colocara a modo de techo sobre una cabaña, su efecto sería caldear el interior. Y si a los rayos solares se les obligara a pasar por una trampilla hacia el sótano, siendo éste de altura suficiente para conducir los rayos hacia un foco, se produciría calor suficiente para hornear o asar provisiones para una familia.»

La misión *Galileo*

Desde su órbita alrededor de Júpiter, la nave espacial Galileo *observa el planeta y sus satélites naturales, al tiempo que da cuenta de un mundo desconocido*

Torrence V. Johnson



El 7 de diciembre de 1995 el breve resplandor de una estrella fugaz de nueva factura iluminó el cielo de Júpiter. El cuerpo que se precipitó en los tenues gases de la alta atmósfera joviana, a casi 50 kilómetros por segundo, no fue un meteoro ni un cometa, sino un ingenio creado en la Tierra. A los pocos minutos se abrió un paracaídas, para frenar el proyectil, y se desprendió lo que quedaba de la capa protectora contra el calor. La sonda descendió y envió a la nave nodriza, el satélite artificial *Galileo*, situado unos 200.000 kilómetros más arriba, datos sobre estructuras nebulares, composiciones, temperaturas y presiones.

La nave almacenó las señales para su posterior transmisión a los científicos que esperaban en la Tierra. Cuando las señales procedentes de la sonda se desvanecieron, se activó un cohete de *Galileo* durante casi una hora, que situó la nave en una gran órbita alrededor del planeta. Tras visitar dos planetas y otros tantos asteroides en un viaje de seis años —durante los que ha realizado además otros descubrimientos inesperados—, ha llegado finalmente a su destino: Júpiter. Trescientos ochenta y cinco años después de que Galileo Galilei descubriera las lunas de Júpiter, un satélite artificial bautizado con su nombre se suma a la interminable circulación de éstas.

El proyecto *Galileo* vio la luz a mediados de los setenta, tras las aproximaciones a Júpiter de los *Pioneer 10* y *11*, cuando ya habían comenzado las ambiciosas misiones *Voyager* hacia los confines del sistema solar. Estaba claro que Júpiter y sus satélites peculiares —que forman una especie de sistema solar en miniatura— merecían algo más que una mirada furtiva. En 1976 un equipo dirigido por James Van Allen, de la Universidad de Iowa, presentó a la NASA el proyecto de una misión doble: una sonda de entrada que estudiara la atmósfera de Júpiter y un complejo aparato que describiese unas doce órbitas alrededor del planeta en dos años con el fin de transmitir información sobre Júpiter, sus lunas y su poderosísimo campo magnético.

El Congreso aprobó la misión. *Galileo* estaba destinado a convertirse, en enero de 1982, en la primera nave planetaria lanzada por un transbordador espacial. Sin embargo, el programa de la lanzadera sufrió reveses técnicos, y lo mismo le pasó al cohete de tres fases propulsado con combustible sólido necesario para que *Galileo* llegara a Júpiter. Después de considerar y descartar varios procedimientos distintos, se eligió como sistema de propulsión un cohete único, de gran potencia, alimentado con hidrógeno líquido. Se retrasó hasta mayo de 1986 la nueva fecha de lanzamiento.

En enero de 1986, poco después del traslado de *Galileo* desde el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de Pasadena hasta el Centro Espacial Kennedy de Cabo Cañaveral, sucedió el trágico



1. *GALILEO* se aproximó a Io, la luna volcánica de Júpiter, el 7 de diciembre de 1995. La acción conjunta de sus propulsores y el arrastre gravitatorio de Io lo situó en órbita alrededor de Júpiter. Sin embargo, por culpa del daño sufrido por la grabadora no pudo realizar observaciones durante su estrecho acercamiento a Io.

accidente del *Challenger*, en el que perecieron sus siete tripulantes. Los siguientes lanzamientos de transbordadores se pospusieron indefinidamente. Además, el cohete de hidrógeno líquido de la nave *Galileo* pareció demasiado peligroso para llevarlo en la bodega de carga del transbordador, y se desechó la idea. El único sistema de propulsión que le quedaba al satélite, un cohete de dos fases alimentado con combustible sólido, no generaba la energía suficiente para impulsarlo hasta Júpiter.

Por suerte, a un equipo de diseño de misiones del JPL se le ocurrió una solución novedosa. Venus y la Tierra podrían empujar la nave; la energía que ésta tomaría del movimiento de los planetas alrededor del Sol complementaría la de un cohete inadecuado. Llegaría, por fin, a Júpiter, y ofrecería de paso aún más observaciones científicas de lo proyectado.

*Galile*o y sus propulsores de combustible sólido se internaron en el espacio, dentro de la bodega de carga del *Atlantis*, el 18 de octubre de 1989. Una vez estuvo en posición de emprender su viaje fuera del transbordador espacial, se encendieron los cohetes de forma que, paradójicamente, cayese hacia el centro del sistema solar. La nueva trayectoria VEEGA (*Venus Earth Earth Gravity Assist*, o contribución gravitatoria Venus Tierra Tierra) portaría la nave hasta Venus y la haría pasar dos veces por la Tierra antes de tomar el rumbo de Júpiter. Aparte de los encuentros planetarios, esta sinuosa ruta incluía dos incursiones a través del cinturón de asteroides, con particular acercamiento a dos de esos miembros de la familia solar, que nunca se habían observado de cerca.

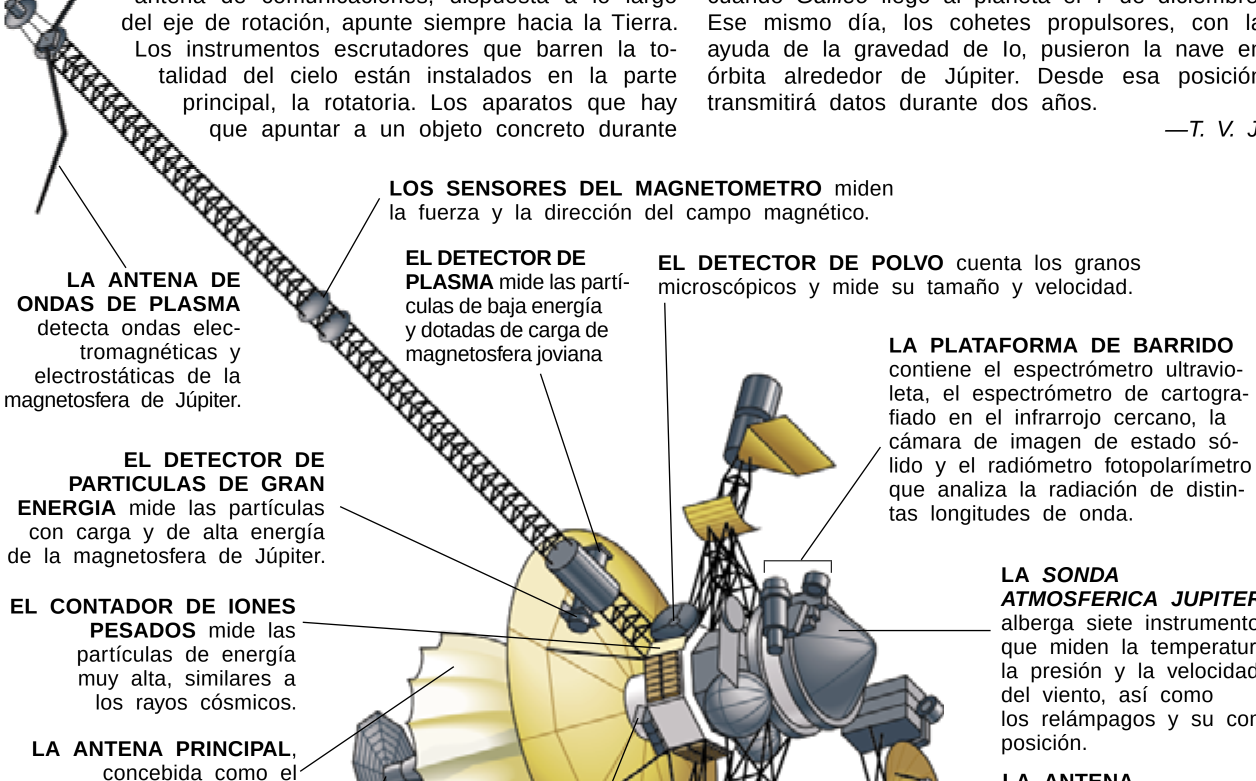
En el camino hacia Venus y, en realidad, durante toda la larga travesía algunos instrumentos instalados a bordo de la nave no dejaron de escrutar el espacio interplanetario. El magnetómetro vigilaba el campo mag-

Equipo instrumental de *Galileo*

La nave *Galileo* cuenta con dos segmentos: uno en rotación y el otro estacionario. La rotación confiere estabilidad y permite que la antena de comunicaciones, dispuesta a lo largo del eje de rotación, apunte siempre hacia la Tierra. Los instrumentos escrutadores que barren la totalidad del cielo están instalados en la parte principal, la rotatoria. Los aparatos que hay que apuntar a un objeto concreto durante un tiempo largo están colocados en la plataforma estacionaria de "barrido".

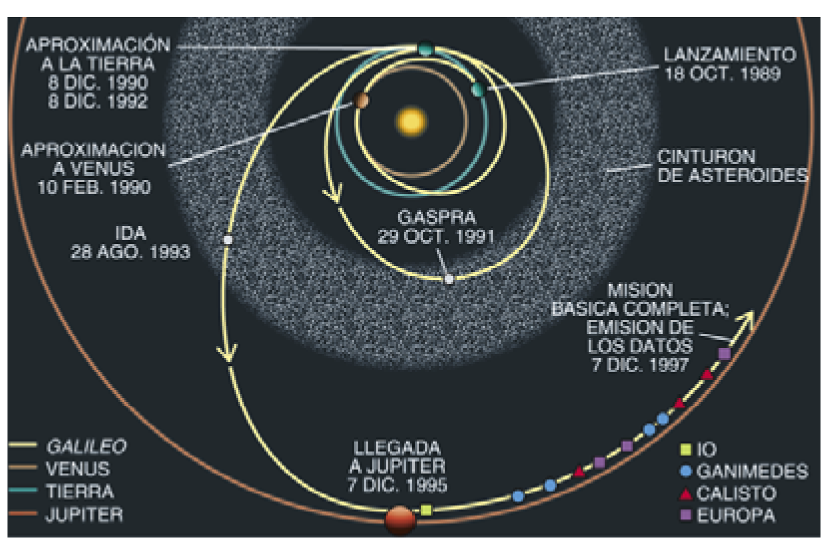
La sonda entró en la atmósfera de Júpiter justo cuando *Galileo* llegó al planeta el 7 de diciembre. Ese mismo día, los cohetes propulsores, con la ayuda de la gravedad de Io, pusieron la nave en órbita alrededor de Júpiter. Desde esa posición transmitirá datos durante dos años.

—T. V. J.



nético interplanetario y el viento solar, constituido por partículas cargadas que manan del Sol y cubren distancias colosales. El instrumento dedicado al ultravioleta lejano también tuvo una utilidad inmediata. Las mediciones tomadas por *Galileo* sirvieron para calcular la variación de la radiación del Sol según la latitud de la zona de emisión, lo que nos ha permitido actualizar los modelos de dinámica solar.

Los transmisores de radio, de uso en las comunicaciones, también proporcionaron datos científicos de gran valor. Desde el lado opuesto del Sol, *Galileo* envió ondas de radio al JPL que rozaron apenas la superficie solar visible. Gracias a los efectos que causaban en esas ondas, pudieron medirse los procesos turbulentos que acontecen en el Sol y los modos diversos en que se expulsa el material que pasa a ser parte del viento solar.



2. EL SINUOSO CAMINO hacia Júpiter de *Galileo* le ha hecho pasar por Venus, dos veces por la Tierra y otras tantas a través del cinturón de asteroides. Una vez en órbita alrededor de Júpiter, se acercará mucho a las cuatro lunas mayores del planeta.

La nave debía cubrir la primera etapa de su misión con su antena principal, una suerte de paraguas cerrado y oculto tras una lámina que la protegía de los rayos directos del Sol. Pero sin abrirse no sirve para nada tan importante instrumento, diseñado para transmitir los datos muy velozmente. Porta también el satélite sendas anténulas en cada extremo, aunque carentes de la potencia necesaria para enviar información a semejantes distancias.

Por eso se programó la grabadora de cinta magnética de *Galileo* con el fin de que registrara la información de Venus durante las primeras horas del acercamiento. Los bits de información se enviaron a la Tierra por medio de una de las antenas de baja ganancia —la que apuntaba a nuestro planeta— durante la primera visita de la nave, en diciembre de 1990. La proximidad garantizaba la recepción nítida de las señales, pese a la baja potencia de su emisión. Las imágenes infrarrojas tomadas procedían del interior de la atmósfera de Venus y proporcionaron la visión más detallada obtenida hasta ahora de la estructura y la dinámica de sus capas inferiores de nubes.

Galileo también pudo observar a la Tierra desde la perspectiva de un explorador interplanetario, y produjo un impresionante reportaje de nuestro acuoso planeta. La nave examinó los confines exteriores del campo magnético de la Tierra y tomó las primeras mediciones de la cara oculta de la Luna desde los tiempos del programa *Apolo*. Estas imágenes descubrieron antiguos procesos volcánicos en regiones no visitadas por los astronautas y confirmaron la existencia de una cuenca de impacto, antigua y enorme, en la cara oculta, la cuenca Polo Sur-Aitken.

Poco después de su último paso por la Tierra, *Galileo* hubo de enfrentarse a un grave problema técnico. Como la nave estaba ya a una distancia razonable del Sol, los controladores en tierra ordenaron la apertura de la antena principal. Los motores no funcionaron ni 10 segundos antes de detenerse. El estudio de la contrariedad reveló que no se habían desplegado algunas varillas de la antena, seguramente tres; el instrumento se había convertido en pura chatarra. Ningún esfuerzo, de los muchos empeñados, ha conseguido abrir la antena. Por lo que parece, las varillas están atascadas debido a la pérdida de lubricante durante los largos viajes en camión que hizo la nave: de la costa del Pacífico a la atlántica en 1986, de vuelta al Pacífico cuando se retrasó el lanzamiento y otra vez a la costa atlántica en 1989.



3. LA CARA NOCTURNA DE VENUS, fotografiada en luz infrarroja por la nave durante su paso cerca del planeta. La radiación térmica se origina a gran profundidad dentro de la atmósfera; gracias a ello se observó la capa interna de nubes.

Durante unos meses desoladores, el equipo pensó que buena parte de la misión, si no toda, se había ido al traste. Los datos de la nave podrían llegar a la Tierra gracias a la pequeña antena con la que se habían mantenido las comunicaciones desde el lanzamiento. Pero los planes para la toma de datos en órbita dependían fundamentalmente de la antena principal, diseñada para transmitir 134.000 bits por segundo. Tras varias reuniones de intenso debate, el equipo de planificación llegó al convencimiento de que gran parte de los objetivos científicos podrían alcanzarse con la anténula.

Había que estar atentos al inminente encuentro con Gaspra, el primero de una nave espacial con un asteroide. Los planes para su observación estaban muy adelantados y se basaban en la comunicación veloz por medio de la antena principal tanto para acercar el satélite al asteroide como para enviar la información a la Tierra.

Trabajando sin descanso, los ingenieros calcularon cómo sustituir las veinte o más imágenes necesarias para la navegación previstas por sólo cinco. (El obturador de la cámara se mantuvo abierto, con lo que las estrellas aparecieron como rayas; y así una imagen valió por varias.) Se disponía del tiempo justo para recibir de la antena de baja ganancia estas imágenes imprescindibles que servirían

¿Por qué Júpiter?

Los vuelos de aproximación de *Voyager I* en 1979 convencieron a los astrónomos de que Júpiter y sus lunas encierran un interés muy superior al que se había imaginado. El sistema joviano, con sus lunas de tamaño planetario que describen órbitas circulares coplanares, se parece mucho a un pequeño sistema solar.

Júpiter recuerda a una estrella. Contiene un 70 por ciento de la masa de todos los planetas de nuestro sistema solar juntos y consta principalmente de hidrógeno y helio. La energía gravitatoria que se desprendió al formarse el planeta hace 4500 millones de años, atrapada aún en sus profundidades, se va liberando paulatinamente, de modo que el planeta radia casi el doble de la energía que recibe del Sol.

Su atmósfera es el mejor exponente de la nebulosa original a partir de la cual surgió el sistema solar. La nebulosa contiene elementos ligeros, sobre todo hidrógeno y helio, que los planetas rocosos como la Tierra o no han poseído nunca, o perdieron hace mucho. En el Sol mismo los gases han sufrido una modificación debido a la combustión termonuclear. Pero en el planeta gigante todo, mantenido por la gigantesca gravedad, se ha conservado como fue en un principio. La sonda de *Galileo*, al revelar los datos relativos a la composición del gas y el polvo, mejora nuestro conocimiento de cómo nació el sistema solar.

Júpiter no tiene superficie en el sentido habitual de la palabra. El hidrógeno se hace más denso con la profundidad y a niveles bastante someros se condensa formando un líquido caliente. A través de este océano de hidrógeno cae una lluvia perpetua de helio. Más abajo, el hidrógeno se comporta como un metal y proporciona quizá la alta conductividad eléctrica necesaria para generar el poderoso campo magnético de Júpiter.

Con su elevada gravedad, rotación rápida y química poco habitual, Júpiter constituye un banco de pruebas único. Muchas de las mediciones acometidas por la sonda están pensadas para proporcionar "un suelo de verdad" que facilite la calibración de los modelos atmosféricos que, finalmente, nos servirán para conocer la Tierra.

Se piensa que los dieciséis satélites de Júpiter se formaron a partir de una nube de gas, polvo y hielo que rodeaba el planeta, del mismo modo que los planetas se formaron alrededor del Sol. Las grandes lunas



JUPITER CON DOS DE SUS SATELITES, IO (*IZQUIERDA*) Y EUROPA (*DERECHA*)

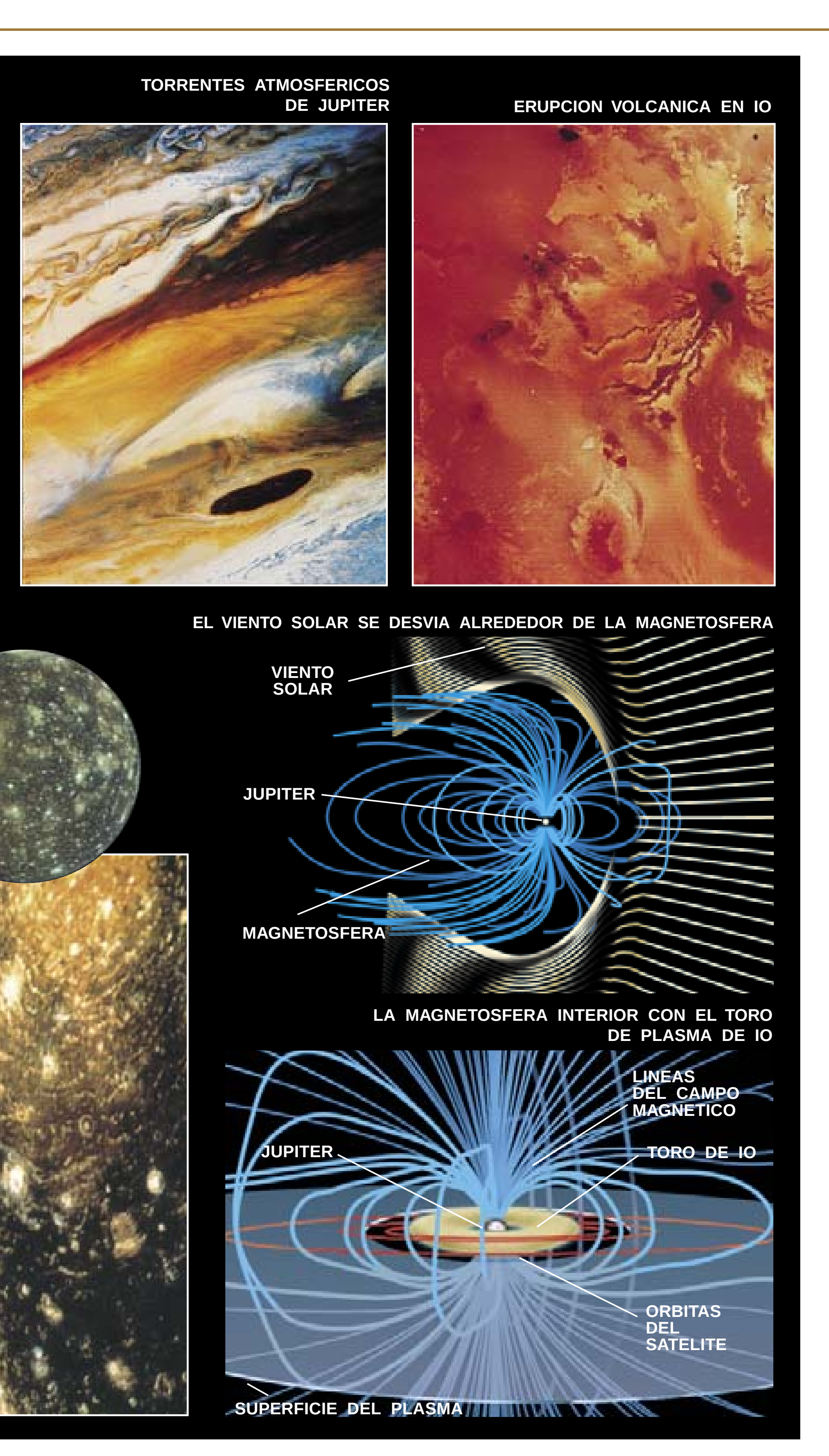
EUROPA

CALISTO

GANIMEDES

para precisar la posición de *Galileo*. La comunidad astronómica internacional contribuyó con una campaña de observaciones de la órbita de Gaspra, elemento vital para determinar la situación de la nave con respecto al asteroide.

A la grabadora de cinta magnética con capacidad de gigabits, ya utilizada durante el acercamiento a Venus, se le asignó el almacenamiento de las imágenes de Gaspra. Debido a que el *Galileo* aún debía visitar la Tierra una última vez, la grabación podría recuperarse con la antena de baja ganancia, mientras la nave estuviera cerca. Gracias a esta estrategia se salvaron los principales experimentos, pese a la pérdida de las transmisiones inmediatas de la antena principal.



rocosas, Io y Europa, están más próximas a Júpiter, igual que Mercurio y Venus son los más interiores del sistema solar. Más lejos, Ganimedes y Calisto poseen un mayor número de elementos ligeros, como el hidrógeno (en forma de hielo).

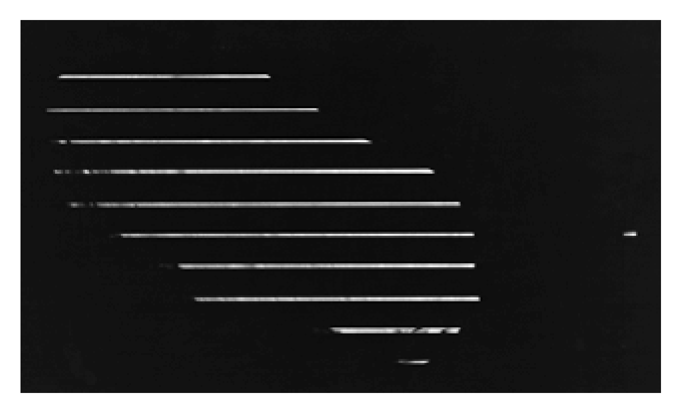
Con un tamaño parecido al de la Luna, Io es el cuerpo de mayor actividad volcánica de todo el sistema solar: la lava renueva su superficie cada pocos cientos de años. Al contrario de lo que sucede en la Tierra, cuyos volcanes reciben la energía del calor de los radioisótopos, los de Io se calientan por las distorsiones de marea que producen Júpiter y los otros satélites. Las nubes volcánicas crean una atmósfera no uniforme de dióxido de azufre, parte del cual se escapa del planeta; el resto se congela sobre la superficie.

Europa, del tamaño de nuestra Luna, tiene una extraña superficie fracturada y helada que hace que sea diez veces más brillante en luz refleja. Ganimedes y Calisto, lunas envejecidas y cubiertas de cráteres, tienen grandes cantidades de hielo; su tamaño es el de Mercurio. Los once acercamientos de *Galileo* a estos cuatro satélites revelarán numerosos detalles, como el espesor de la corteza de Io, la composición de las rocas de Calisto y el espesor del recubrimiento helado de Europa.

La zona que rodea a un planeta dominada por su campo magnético se denomina magnetosfera. Júpiter tiene la mayor magnetosfera del sistema solar: si el volumen de espacio que contiene se pudiera hacer visible al ojo humano, nos parecería en nuestro cielo nocturno mayor que la Luna llena.

La magnetosfera forma una barrera que se levanta ante las partículas cargadas eléctricamente del viento solar, al que fuerza a desviarse y fluir alrededor del obstáculo invisible. Una onda de choque se forma en dirección contraria al flujo, en el borde de la magnetosfera que se orienta hacia el Sol; en la misma dirección del flujo, el campo magnético se alarga y dibuja una “magnetocola”. La magnetosfera alberga partículas cargadas de alta energía, corrientes inmensas y una gama abrumadora de ondas electromagnéticas. Un enorme anillo en rotación, o toro, compuesto de iones de oxígeno y azufre, rodea a Júpiter y constituye la parte interna de la magnetosfera. Este material proviene de Io, que ha de proporcionar aproximadamente una tonelada del mismo por segundo.

T. V. J.





4. LOS BARROTES CARCELARIOS, cortes de las imágenes que se tomaron del asteroide Ida, se transmitieron a la Tierra a fin de localizar las secciones de interés sin tener que enviar las imágenes completas. (El fallo de la antena principal hizo necesaria tanta austeridad en la transmisión de los datos.) Los barrotes descubrieron una pequeña mancha a uno de los lados de Ida (*izquierda*); al recuperar la imagen completa (*derecha*), se determinó que se trataba de una roca de un kilómetro en órbita alrededor de Ida, la primera luna asteroide conocida hasta ahora.

Pedimos algunas imágenes inmediatamente después del encuentro para comprobar de qué habían servido nuestros esfuerzos. La navegación había procedido con extraordinaria precisión. En las imágenes se veía por primera vez un asteroide de cerca. Descubrían una roca irregular con muchos cráteres de impacto pequeños, pero con menos cráteres grandes de lo esperado. Muchas de las partículas que componen el cinturón de asteroides eran, por lo visto, menores de lo que se había estimado. Y parecía que Gaspra se había separado recientemente, haría entre 300 y 500 millones de años, de un cuerpo rocoso mayor.

El resto de los datos se transmitió cuando *Galileo* volvió a casa por última vez, a finales de 1992. Se descubrió con sorpresa el cambio de dirección del campo magnético interplanetario cerca de Gaspra, como si encontrara un obstáculo magnético. Si Gaspra poseyese un campo magnético, afectaría al campo del viento solar. Estaba claro que las propiedades magnéticas de los asteroides encerraban enorme interés.

El segundo encuentro con la Tierra brindó la ocasión de realizar calibraciones sumamente útiles, proporcionó vistas excelentes de las regiones del polo norte de la Luna, y, a modo de despedida, nos regaló una película hermosísima de la Luna y la Tierra juntas.

El impulso gravitatorio de la Tierra envió a la nave hacia su destino final el 8 de diciembre de 1992. Se ajustó la trayectoria para que *Galileo* arribara a Júpiter el 7 de diciembre de 1995. En su camino se encontraría con el asteroide Ida el 28 de agosto de 1993. Esta cita presentaba nuevas dificultades. Para esquivar el cuello de botella en las comunicaciones se habían descartado la utilización de la antena principal, que seguía atascada, y el efectuar más pasos por la Tierra. La velocidad de transmisión de los datos de Ida no superaría los 40 bits por segundo. Sin embargo, queríamos observar a Ida a la mitad de distancia del avistamiento de Gaspra. Como Ida es unas dos veces mayor que Gaspra, su retrato tendría una superficie cuatro veces mayor.

Para obtener de Ida datos mejores que los recabados de Gaspra, hubo que aplicarse a la navegación. Se desarrollaron técnicas de búsqueda en la cinta grabada con el fin de que no se mandasen a la Tierra imágenes del “cielo negro”, y así la antena quedara libre para transmitir sólo las imágenes esenciales. La naturaleza nos ayudó: Ida tiene un período de 4,65 horas, unos dos tercios del período de Gaspra, y *Galileo* observaría todos los lados de Ida más cerca.

Las primeras imágenes mostraron que Ida era un objeto extremadamente irregular, de unos 56 kilómetros de largo y con una superficie sembrada de cráteres. Pertenece a la familia Koronis, grupo de asteroides cuya existencia parece deberse a la desintegración de un cuerpo progenitor mayor, que mediría unos 100 kilómetros de diámetro. Algunos teóricos aducían que la desintegración tuvo lugar no hace más de algunas decenas de millones de años. Pero la superficie de Ida, marcada por los cráteres, muestra signos de envejecimiento y sugiere que la familia Koronis, y quizás otras también, pudiera tener mil millones de años o más.

Aún nos aguardaba otra sorpresa. En febrero de 1994 se empezó a examinar el resto de la cinta que contenía las imágenes de Ida. Pequeñas partes de algunas de ellas se habían obtenido en forma de “barrotes carcelarios” —es decir, mediante secuencias en las que se transmitía un barrido de unas cuantas líneas, se saltaban muchas, se emitían unas pocas más y así hasta el final de la imagen. Se localizaron las secciones que contenían datos de Ida para recuperarlos más adelante.

Cuando se estudiaron los “barrotes”, Ann Harch detectó una extraña mancha a un lado de Ida. El equipo examinó, una a una, las fuentes astronómicas que podrían haber salido en el fondo de la imagen sin que se hubieran percatado de ello. Al no encontrar ninguna, concluyeron que habían dado con un pequeño asteroide junto a Ida, seguramente una luna.

El equipo que se encarga de los infrarrojos, donde aparecían también barrotes, confirmó la presencia del asteroide. Ambos grupos se percataron de que trabajaban con imágenes del mismo objeto ligeramente diferentes. Un cálculo rápido de los ángulos de paralaje mostró que la roca estaba a unos 100 kilómetros del centro de Ida y que no se había movido mucho en los minutos que mediaron entre una observación y la siguiente. El pequeño cuerpo, que se movía tan despacio y estaba tan cerca de un asteroide de ma-

TORRENCE V. JOHNSON dirige el grupo de expertos adscritos a la misión *Galileo*. Tras obtener su doctorado en ciencia planetaria por el Instituto de Tecnología de California, trabajó en el de Massachusetts. En la actualidad es investigador del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena.

yores dimensiones, era casi con total seguridad un satélite. La Unión Astronómica Internacional lo bautizó con el nombre de Dáctilo ("Dactyl"), en honor a los Dáctilos, hijos mitológicos de Ida y Júpiter.

En casi todas las imágenes de Ida aparecía Dáctilo. Las imágenes de alta resolución revelaron que la luna era un objeto con forma de patata, marcado de hoyuelos. No se trataba, en efecto, de un fragmento reciente producido por una colisión. Su órbita tiene un período de 24 horas, o más. La gama de órbitas que casan con las observaciones ayuda a acotar la masa y, por tanto, la densidad de Ida, que resulta similar a la de meteoritos rocosos.

El descubrimiento de la luna de Ida generó un sinfín de interrogantes. Por ejemplo, el de su origen. Una colisión podría haber puesto en órbita un pedazo de la propia Ida (una variante de esta idea es que la Luna se formó cuando un impacto descomunal arrancó de la superficie de la Tierra una cantidad de materia que se amalgamó con los restos del objeto causante del impacto). Pero entonces el fragmento tendría que haber chocado contra otro residuo situado estratégicamente; de no haber sido así, hubiera vuelto a caer sobre Ida. Lo probable es que Dáctilo e Ida nacieran de la fragmentación de un cuerpo de la familia Koronis. Si ambos pedazos permanecieron próximos entre sí, pudieron quedar vinculados gravitatoriamente.

La opinión está dividida acerca de la probabilidad de que un asteroide adquiera un satélite y el tiempo de vida de éste. Desde principios de siglo han venido sucediéndose indicios, de dispar origen, de que algunos asteroides podrían ser binarios, dos cuerpos que describen órbitas uno alrededor del otro en un espacio reducido. Pero las rocas pequeñas salen de su órbita con mucha facilidad debido a los efectos perturbadores del Sol y de otros planetas, sobre todo Júpiter. Dáctilo, que gira a unos pocos radios de Ida, cae dentro de la influencia de ésta, pero queda por ver cuánto tiempo logrará permanecer así.

En julio de 1994, cuando aún faltaba año y medio para llegar a Júpiter, *Galileo* contempló todo un espectáculo: el impacto del cometa Shoemaker-Levy 9 en la cara oscura del planeta. Sin embargo, había que programar el ordenador de la nave meses antes del acontecimiento, cuando aún se desconocía el instante exacto de los impactos. Para obviar ese inconveniente, debían registrarse muchas más imágenes de las que podían enviarse a la Tierra por medio de la antena de baja ganancia. Para ello se utilizaron técnicas de búsqueda en las cintas de grabación como las empleadas durante el encuentro con Ida. Además, el análisis de los fenómenos que se habían observado desde la Tierra y desde el *Telescopio Espacial Hubble* ayudó a localizar y recuperar sólo las secciones de la grabación que contenían datos sobre el impacto.



5. LA SONDA ATMOSFERICA de Júpiter descendió sobre el planeta el 7 de diciembre de 1995. Durante el descenso se quemó gran parte de la capa protectora (*abajo*); el resto se desprendió después de que un paracaídas redujese la velocidad de la sonda, y dejó los instrumentos al descubierto, que midieron la velocidad del viento, la composición de las nubes, la frecuencia de los relámpagos y otros aspectos de la atmósfera.

Galileo observó la luz visible y la infrarroja cercana producidas por la entrada y explosión de varios fragmentos del cometa. Destacan las imágenes del último suceso. Tomadas en luz verde a intervalos de 2,33 segundos, muestran un planeta giboso con un punto incandescente en la parte oscura, cuyo brillo crece y luego se apaga, la señal de la violenta muerte del fragmento W.

También se registraron datos de vital importancia sobre el gran suceso *G* mediante experimentos llevados a cabo en el ultravioleta e infrarrojo y con el radiómetro fotopolarímetro. Gracias a ellos se calcularon de forma directa el tamaño, la temperatura y la altitud de la bola de fuego. Apareció como un globo de unos ocho kilómetros de diámetro y 7500 grados kelvin de temperatura que, a medida que ascendió en la atmósfera, se expandió y enfrió rápidamente. El análisis de esa avalancha de datos durará años.

Desde mediados de 1994, el detector de polvo de la nave, que mide los impactos de micrometeoritos no mayores que las partículas del humo del tabaco, ha venido registrando los flujos de polvo procedentes de Júpiter. En agosto, a 62 millones de kilómetros del planeta todavía, *Galileo* se fue abriendo camino a través de la tormenta de polvo más intensa que se haya podido medir hasta el momento. Durante cuatro semanas, el detector fue embestido hasta por 20.000 partículas que se movían a una velocidad entre 40 y 200 kilómetros por segundo. Los granos de polvo, demasiado pequeños para dañar la nave, pudieron originarse en los anillos de Júpiter o en los volcanes de Io. Seguramente son granos con carga eléctrica que el campo magnético de Júpiter aceleró y arrojó hacia el espacio.

En octubre, los responsables de la misión sufrieron un sobresalto más. La grabadora, que había funcionado durante años, no dejaba de rebobinar al llegar al principio de la cinta. En el momento en que se escribe esto, el equipo se inclina a creer que se ha estropeado la grabadora hasta quedar casi inservible. No obstante, la nave todavía cuenta con algo de memoria de estado sólido que puede aprovecharse para almacenar y transmitir imágenes de alta resolución, la mitad, quizá, de las que habría admitido la grabadora.

La llegada de la sonda a Júpiter el 7 de diciembre de 1995 marcó el principio de su misión central. La información aportada por la nave, un breve conjunto de datos (basta un disco blando para almacenarlos) pero valiosísimo, se recuperó íntegramente. A partir de este momento, *Galileo* se concentra en la realización de un sinfín de medidas del planeta gigante, sus cuatro lunas mayores y su colosal campo magnético.

La capacidad de la nave se ha mejorado considerablemente. Cuando se programaron en un principio los ordenadores de *Galileo*, las técnicas de compresión de datos eran aún primitivas. Un paquete de programas completamente nuevo permite que los datos se procesen, editen y compriman a bordo, lo que decuplica por lo menos el contenido de información de cada bit.

Además, una modificación de la Red del Espacio Lejano (*Deep Space Network*, DSN) permite recoger las débiles señales procedentes de la antena de baja ganancia. La DSN es un grupo de tres instalaciones de seguimiento situadas en Goldstone, Madrid y Canberra. Separadas por 120 grados de longitud, las estaciones aseguran la visibilidad de cualquier nave espacial en todo momento.

Las antenas se utilizan por separado para seguir diferentes naves espaciales. Pero cuando se requiere una alta sensibilidad se sintonizan electrónicamente y se crea una suerte de antena receptora mucho mayor. *Voyager* hizo uso de esta posibilidad en su visita a los planetas Urano y Neptuno, y *Galileo* la empleará de forma habitual mientras observe Júpiter.

Estas mejoras, en combinación con otros cambios en el modo en que las naves espaciales codifican los datos, aumentan hasta 1000 bits por segundo la capacidad de información del enlace de telecomunicaciones. Con esta capacidad, los objetivos primarios de *Galileo* —la obtención de datos de alta resolución de los objetos a los que se aproxima y el estudio del campo magnético— podrán cumplirse. *Galileo* observará los satélites jovianos con la resolución con la que el LANDSAT, por ejemplo, toma imágenes de la Tierra. Otros proyectos, como la observación de Io en el primer encuentro, la medición de los fenómenos magnetosféricos con resoluciones temporales altísimas o la realización de un reportaje de la gran mancha roja no son posibles sin la antena de alta ganancia y la grabadora.

Es imposible predecir qué podría haberse descubierto con el amplio barrido del sistema joviano que se había planeado originalmente. Pero el equipo de la sonda ya ha demostrado que es capaz de realizar descubrimientos impresionantes mediante el uso inteligente de bajas cantidades de bits.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE NEW SOLAR SYSTEM. J. Kelly Beatty y Andrew Chalkin. Sky Publishing, 1990.

JUPITER: THE GIANT PLANET. Reta Beebe. Simon & Schuster, 1994.

LÍNEA DIRECTA DESDE JÚPITER, disponible a través del World Wide Webb en http://quest.arc.nasa.gov/Jupiter.html, o vía gopher en quest.arc.nasa.gov bajo el directorio de Interactive Projects.

El sistema inmunitario del cerebro

Lo forman las células de la microglía. Destinadas a funciones de protección, en ocasiones revelan una sorprendente agresividad. Pueden contribuir al desarrollo de enfermedades neurodegenerativas y a la demencia del sida

Wolfgang J. Streit y Carol A. Kincaid-Colton

Cuando los biólogos observan en el microscopio tejidos sanos procedentes de cerebro o de médula espinal, no suelen ver leucocitos de la sangre, los centinelas mejor conocidos del sistema inmunitario. Y hay una buena razón de que así sea. Aunque los leucocitos nos defienden frente a la infección y el cáncer, también pueden segregar sustancias capaces de destruir células irremplazables del sistema nervioso, las neuronas. El organismo evita ese ataque restringiendo el paso de las células inmunitarias desde los vasos sanguíneos hacia el sistema nervioso central. Para introducirse en el tejido nervioso, los leucocitos han de esperar el desgarro o la alteración patológica de los vasos.

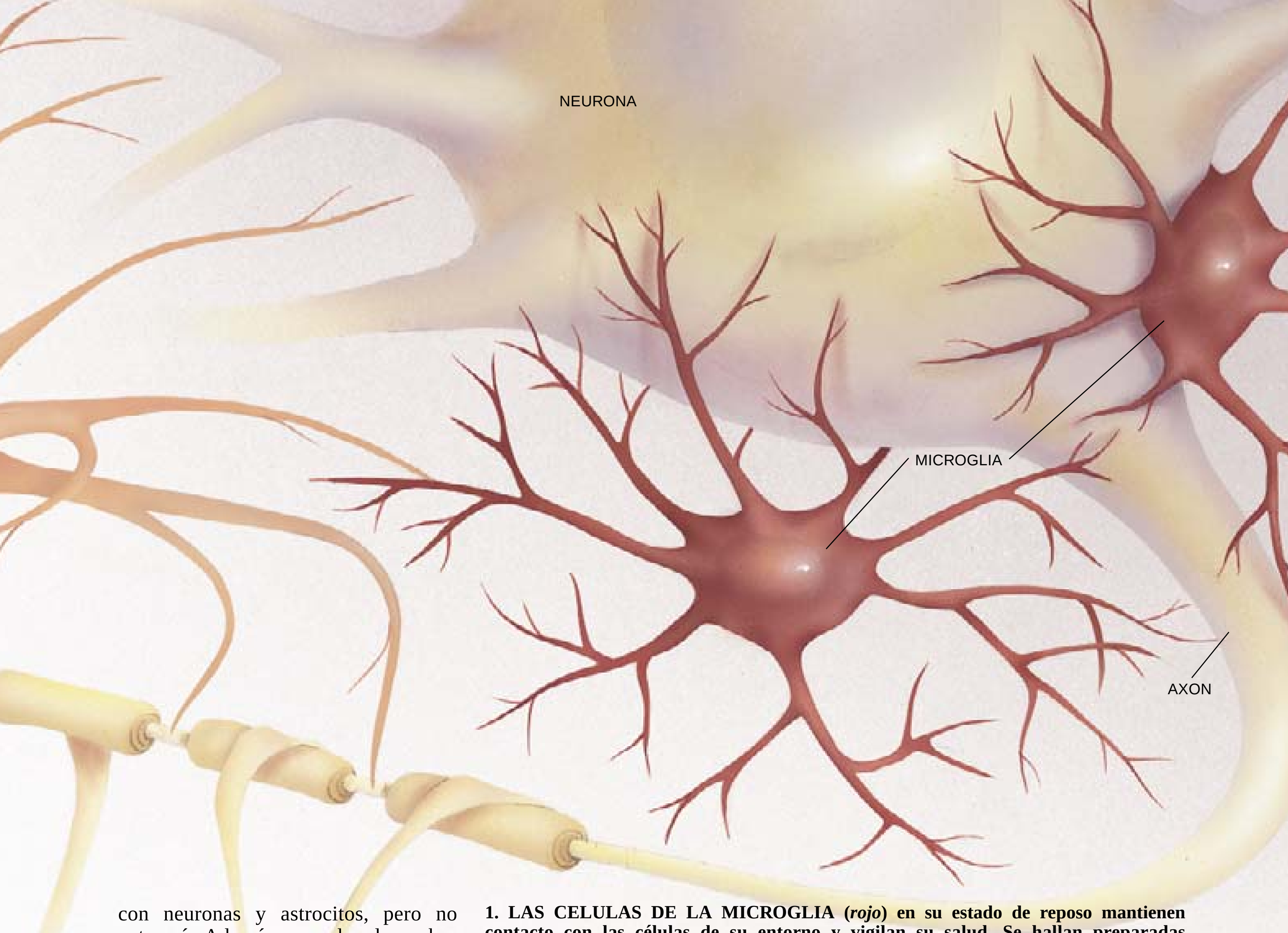
Por todos esos datos, creyóse en el pasado que el sistema nervioso carecía de protección inmunitaria. Sin embargo, los investigadores han demostrado recientemente que unas células fascinantes, agrupadas bajo el nombre colectivo de microglía, forman allí una extensa red defensiva. Las células de la microglía dedican la mayor parte de su tiempo a servir a las neuronas. Pero datos cada vez más convincentes nos dicen que a veces pierden tal naturaleza benéfica. Se sospecha con fundamento que estas células pueden contribuir al desarrollo o a la exacerbación de algunas afecciones: infarto cerebral, Alzheimer, esclerosis múltiple y otras enfermedades neurodegenerativas.

Las células de la microglía se encuadran en un grupo más amplio conocido como glía (palabra tomada del griego donde significa sustancia viscosa), cuya existencia se reconoció a comienzos del siglo XIX. En un principio, los biólogos consideraron erróneamente que la glía constituía una unidad, que venía a ser una suerte de argamasa irrelevante entre neuronas del cerebro o médula espinal. Pero en los años veinte de nuestro siglo los microscopistas habían identificado tres tipos de células de la glía: los astrocitos, los oligodendrocitos y la microglía. Cincuenta años después se vio claro que los dos primeros tipos, por lo menos, cumplían funciones de sumo interés.

Los astrocitos, de morfología estrellada y cuyo soma celular es el de mayor tamaño de todo el grupo, absorben neurotransmisores que puedan encontrarse en exceso alrededor de las neuronas, protegiendo así las células nerviosas de recibir una estimulación desmedida. Por su lado, los oligodendrocitos, cuyo cuerpo celular les sigue en tamaño, producen la vaina de mielina que aísla los axones (largas proyecciones que se extienden desde los somas celulares y transportan señales eléctricas). Algunos sospechaban que el grupo constituido por las células más diminutas, las que forman la microglía, realizaban también una función especial, de índole inmunitaria. Sin embargo, hasta los años ochenta no se dispuso de las herramientas necesarias para ratificarlo.

La idea surgió de la investigación minuciosa que a comienzos del siglo XX realizó Pío del Río Hortega, discípulo de Santiago Ramón y Cajal. En 1919 del Río había desarrollado una tinción, con carbonato de plata, que permitió distinguir la microglía de neuronas, astrocitos y oligodendrocitos, en cortes de cerebro de mamíferos. A partir de entonces se dedicó durante más de un decenio a profundizar en la naturaleza de tales células.

Averiguó que la microglía aparecía en forma de cuerpos amorfos en el cerebro en desarrollo; luego, se diferenciaban en formas muy ramificadas que colonizaban todas las regiones del cerebro y establecían contactos



1. LAS CELULAS DE LA MICROGLIA (*rojo*) en su estado de reposo mantienen contacto con las células de su entorno y vigilan su salud. Se hallan preparadas para responder con rapidez a cualquier agresión.

con neuronas y astrocitos, pero no entre sí. Además, cuando el cerebro sufría una grave lesión, respondían de manera espectacular. Observó que, en la reacción ante una herida incisiva, las células ramificadas retraían sus finas protuberancias para retornar a su conformación inmadura, redondeada.

Del Río advirtió que en esta última etapa la microglía se asemejaba a los macrófagos, clase de leucocitos que no se halla en el tejido cerebral. Sabía, asimismo, que, cuando los macrófagos percibían que algo atacaba al tejido o sufría una infección, éstos emigraban a las áreas afectadas, proliferaban y se hacían muy fagocíticos; es decir, se convertían en carroñeros, eliminadores de detritus, capaces de engullir y degradar microbios, células moribundas y otros materiales de desecho. Hacia 1932 avanzó la idea de que la adopción de la forma redondeada de la microglía madura reflejaba una metamorfosis hacia el estado fagocítico. En otras palabras, pensó que la operación de la microglía remedaba la desempeñada por los macrófagos.

Pese a la coherencia del razonamiento expuesto por del Río, muy pocos le secundaron, en buena parte debido a su método de tinción, que resultó ser poco fiable. Sin un medio seguro para distinguir la microglía de otras células, no era mucho lo que se podía averiguar acerca de sus funciones. Situación que duró hasta los años ochenta, cuando el grupo oxoniense de V. Hugh Perry inició estudios sistemáticos con anticuerpos monoclonales que se unieran a la microglía. Un anticuerpo monoclonal reconoce con suma especificidad su proteína diana, es decir, su antígeno. El grupo de Perry sabía que, si esos anticuerpos encontraban su diana en la microglía, y no en otras células del sistema nervioso central, podrían muy bien convertirse en una "tinción" excelente. La microglía destacaría entre las demás células si lograban vincular a algún marcador detectable los anticuerpos enlazados; el marcador podría ser, por ejemplo, un compuesto fluorescente.

En 1985 Perry demostró que varios anticuerpos monoclonales preparados por otros grupos podían cartografiar la microglía cerebral. Se reunió un conjunto nutrido de anticuerpos útiles para este propósito. Su introducción, junto con la llegada por entonces de métodos para mantener poblaciones puras de microglía en placas de cultivo, permitió examinar la actividad de estas células.

Los anticuerpos no se limitaron a realzar la presencia de la microglía; respaldaron la hipótesis de la función de ésta en la defensa inmunitaria del cerebro y la médula espinal. A mayor abundamiento, varios anticuerpos que reconocen proteínas y sólo se dan en células del sistema inmunitario encontraron también su diana en la microglía. Más aún, algunos de los anticuerpos demostraban que las células se comportaban como macrófagos.

Los macrófagos y algunos de sus congéneres son presentadores de antígenos: trocean proteínas fabricadas por los microbios invasores y exponen sus fragmentos en hendiduras moleculares denominadas antígenos del complejo

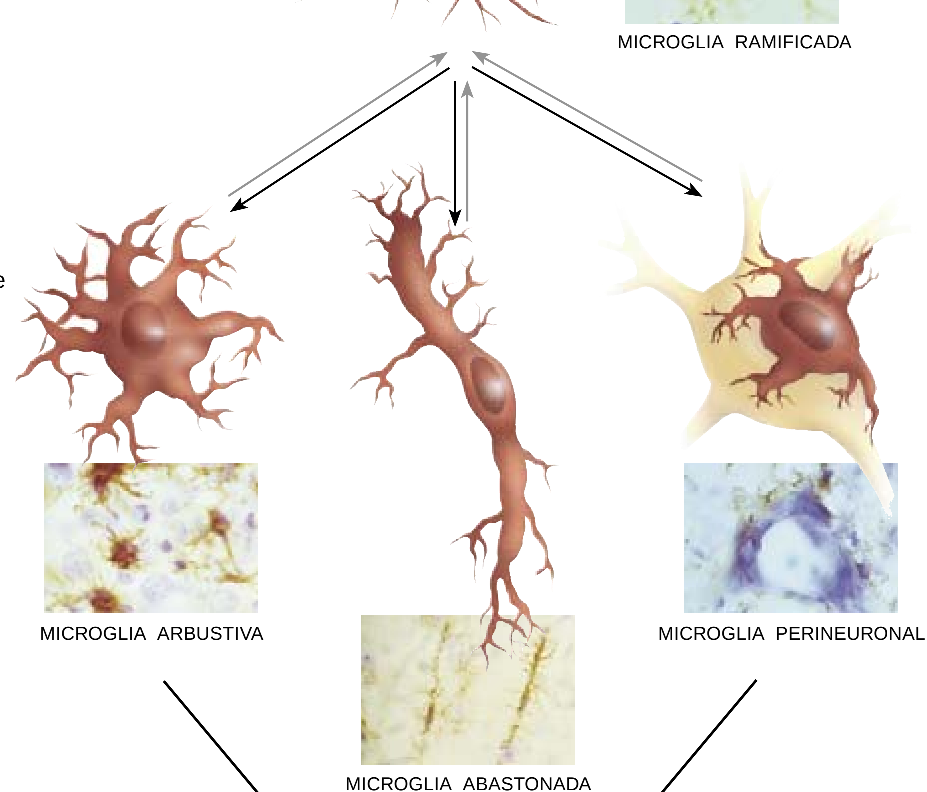
Las múltiples caras de la microglía

La microglía (*marrón dorado en las micrografías*) suele hallarse en estado de reposo, con numerosas ramificaciones desplegadas (*arriba*) que se retraen cuando advierten que una neurona corre peligro. Emigran hacia el punto conflictivo y adoptan una nueva conformación (*en el medio*); cuál sea ésta va a depender de la arquitectura de la región. Si las células disponen de espacio suficiente, se tornan arbustivas (*izquierda*); si han de acomodarse entre proyecciones neuronales delgadas y alargadas, tienden a adquirir un aspecto abastonado (*centro*). En otras ocasiones prefieren condicionar su morfología a la de la superficie de las neuronas alteradas (*derecha*). Si la lesión neuronal se corrige, la microglía torna a su estado de reposo (*flechas grises*); pero si las neuronas mueren, la microglía progresa hacia un estado fagocítico (*abajo*) y se afana en la eliminación de todo el material procedente de las células muertas.

Estado 1: Reposo
La microglía ramificada vigila constantemente la salud de las células de su entorno.

Estado 2: Recién activada
La microglía cambia de forma cuando detecta una alteración en su microentorno; por ejemplo la lesión de una neurona.

Estado 3: Fagocítico
En este estado la microglía reacciona ante la muerte de otras células; sus células cambian nuevamente de forma y degradan el material procedente de células muertas.



principal de histocompatibilidad de clase II. Esta exposición provoca el ataque contundente por parte de células inmunitarias adicionales. Entre 1985 y 1989, se comprobó que los anticuerpos monoclonales capaces de engarzarse con los antígenos del complejo principal de histocompatibilidad de clase II solían enlazarse con la microglía. Semejante conducta revelaba que, contra la opinión dominante, la microglía producía antígenos de histocompatibilidad de clase II. ¿Por qué no iba a ser también presentadora de antígenos?

Los resultados con los anticuerpos encajaban con los obtenidos por el equipo de Georg W. Kreutzberg en el Instituto Max Planck de Psiquiatría en Martinsried. El grupo alemán llevaba años estudiando la función de la microglía. Investigó la capacidad macrofágica de la microglía cerebral de roedores en su encuentro con neuronas dañadas. Sometió a criba la tesis, defendida por otros, según la cual la microglía no pertenecía al cerebro, puesto que eran en realidad monocitos que se habían introducido en el cerebro o la médula espinal tras desgarrarse los vasos sanguíneos. No era fácil refutar la última afirmación: entonces, como ahora, los anticuerpos y las tinciones que reconocían la microglía eran los mismos que reconocían los macrófagos derivados de los monocitos del torrente circulatorio.

Kreutzberg aplicó un método sencillo para resolver ambas cuestiones. Como punto de partida, se centró en las neuronas cuyos somas celulares no salían del cerebro, pero sí sus axones, que terminaban en los músculos. Inyectó una toxina en un lugar cercano a las terminaciones de axones y dejó que se propagase por las neuronas hasta matarlas, pero sin dañar los vasos sanguíneos. Esta maniobra aseguraba que cualquier célula con actividad macrofágica que respondiera a la lesión habría de residir en el tejido cerebral. Por último, examinó la región del cerebro que contenía los restos de las células nerviosas afectadas. El análisis del tejido de los animales de experimentación revelaba que la microglía emigraba hacia las neuronas muertas, se multiplicaba y eliminaba las células inertes. Dicho de otro modo, las células de la microglía eran los macrófagos del cerebro.

Experimentos con poblaciones puras de microglía han llevado al convencimiento general de que la microglía es el ejército inmunitario que había imaginado del Río. Se ha confirmado que estas células poseen una extraordinaria movilidad —una propiedad esencial para unas células cuya misión se supone que es la de moverse con facilidad hacia zonas dañadas del cerebro. Asimismo, se ha comprobado que la microglía responde con la producción de un repertorio amplio de sustancias coincidentes con las que fabrican los macrófagos en otros tejidos.

La microglía desempeña una función clave en el desarrollo del embrión. Las células de la microglía pueden segregar factores de crecimiento importantes para la formación del sistema nervioso central. No sólo eso. El feto en crecimiento genera muchas más neuronas y células de microglía que las que necesita. Con el transcurso del tiempo las células sin aprovechar mueren, y las células jóvenes de la microglía, que mantienen su aspecto inicial redondeado y carente de ramificaciones, se encargan de eliminar las células muertas.

A medida que el sistema nervioso central madura, la necesidad de eliminar células en grandes cantidades desaparece y las células de la microglía se diferencian hasta alcanzar su aspecto quiescente en el que exhiben abundantes ramificaciones. Esta conformación permite a las células mantenerse en estado de alerta. Menos conocidas, sin embargo, son otras funciones de la microglía en su estado de reposo, aunque se la relaciona con la liberación de factores de crecimiento, que en esta etapa contribuirían a la maduración de las neuronas y a la supervivencia de la glía. Estas sustancias podrían incluir el factor de crecimiento de los fibroblastos y el factor de crecimiento de los nervios —dos proteínas que la microglía segrega en un medio de cultivo si se la activa.

De mayor respaldo goza otra tesis: las células de la microglía en estado de reposo responden en cuestión de minutos ante los trastornos producidos en su microentorno y envuelven las células lesionadas, neuronas u otras. Externizan su entrada en actividad mediante la retracción de sus ramificaciones, otros cambios morfológicos, producción de proteínas no presentes en el estado de reposo e incremento de la síntesis de proteínas que sólo se fabricaban en cantidades muy pequeñas. En este sentido, se potencia mucho la expresión de los antígenos del complejo principal de histocompatibilidad. Ignoramos si estas células aumentan la liberación de factores de crecimiento, pero podrían muy bien hacerlo para reparar las neuronas interesadas.

La conformación de las células de la microglía recién activadas tiene que ver con la arquitectura de la región donde moran. Si el área está llena de axones, las células se alargan y estrechan, para acomodarse entre los cordones. Si hay espacio para maniobras, como es el caso en muchas zonas del cerebro, las células adquieren un aspecto arbustivo.

Las células activadas no se tornan automáticamente fagocíticas; pueden revertir al estado de reposo si la lesión que han detectado es leve o reversible. Cuando el daño es grave y perecen neuronas, las células de la microglía comienzan a funcionar como macrófagos fagocíticos en toda regla. Cuál sea el destino último de los fagocitos es algo que sigue sin conocerse, aunque las investigaciones con cultivos de microglía y de tejido cerebral enfermo dan a entender que las células atacan las neuronas que debían proteger.

La sospecha de que la microglía podría contribuir a alteraciones neurológicas surgió tras el descubrimiento, mencionado antes, de que liberaba productos que coincidían con los emitidos por los macrófagos fuera del sistema nervioso central. Algunas de estas sustancias son peligrosas para las células y, si se producen en cantidades excesivas, matan las neuronas. El grupo de uno de los autores (Kincaid-Colton) ha observado que, cuando la microglía activada se expone, en el cultivo, a determinados componentes bacterianos, las células, lo mismo que otros macrófagos, generan especies reactivas de oxígeno. Entre estas moléculas se encuentran el anión superóxido, el radical hidroxilo y el peróxido de hidrógeno. Al mismo tiempo que destruyen microbios pueden lesionar membranas, proteínas y ADN de neuronas y otras células.

Otros productos, potencialmente letales, fabricados por microglía y macrófagos en estado de gran activación son las proteasas, enzimas que digieren proteínas y podrían llegar a agujerear las membranas celulares. Debemos citar también dos citocinas, moléculas mensajeras que pueden aumentar la

WOLFGANG J. STREIT y CAROL A. KINCAID-COLTON dirigen sendos programas de investigación convergentes sobre la microglía. Streit es profesor de neurociencias en el Instituto Brian de la Universidad de Florida. Kincaid-Colton enseña biofísica en la facultad de medicina de la Universidad de Georgetown.

inflamación. Estas citocinas —la interleucina-1 y el factor de necrosis tumoral, entre ellas— colaboran en el reclutamiento de otros componentes del sistema inmunitario haciéndolos coincidir en el lugar de la lesión. La inflamación puede ser importante en la eliminación de infecciones o de un cáncer incipiente, pero puede producir efectos indeseados en células cercanas no infectadas. Si se dan ciertas circunstancias, las citocinas dañan las neuronas y el factor de necrosis tumoral ejerce efectos letales sobre los oligodendrocitos.

Que la microglía pueda sintetizar todas estas sustancias cuando se mantiene en un cultivo no constituye una prueba de que también ataque al cerebro. Según parece, el sistema nervioso central mantiene bastante a raya a la microglía, obligándola a que sus secreciones más comprometedoras no sobrepasen ciertos límites, incluso cuando responden ante una lesión o una enfermedad; si así no fuera, resultaría imposible sobrevivir, ya que la microglía está extendida por todo el cerebro. Sin embargo, la investigación sobre ciertas alteraciones neurológicas sugiere que en algunos pacientes ese riguroso control se relaja, bien porque exista un defecto en la misma microglía, bien porque algún otro proceso patológico arruine los frenos fisiológicos de las células.

La hiperactividad de la microglía guarda relación con la demencia que sufren los sidosos. El virus de la inmunodeficiencia humana adquirida no ataca a las neuronas, pero infecta a la microglía. Se ha demostrado que esa invasión provoca en la microglía una producción elevada de citocinas inflamatorias y otras moléculas que son tóxicas para las neuronas.

Una regulación alterada de la microglía podría intervenir también en la enfermedad de Alzheimer. En los cerebros de los enfermos de Alzheimer abundan las placas seniles: regiones anormales en las que depósitos de un fragmento de sustancia amiloide beta (una proteína) se mezclan con la microglía, astrocitos y las terminaciones de neuronas lesionadas. Se supone que estas placas contribuyen a la muerte de las neuronas que subyace en la merma de facultades mentales. Se desconoce de qué modo dañan las células nerviosas. Muchos atribuyen la causa a la sustancia amiloide beta. Para nosotros, la sustancia amiloide beta provoca las alteraciones a través de la microglía. Se sabe ya que las placas seniles portan altos niveles de interleucina-1 y otras citocinas, sintetizadas por la microglía. Dicha concentración manifiesta que algo —tal vez la sustancia amiloide beta— fuerza a la microglía de las placas a entrar en un estado muy activado. Las células que se encuentren en ese estado liberarían, además, especies reactivas de oxígeno y enzimas proteolíticas, con lo que podrían causar destrozos en las neuronas.

La propia microglía podría contribuir a la formación de placas, según otros resultados. Al parecer, la microglía responde a las lesiones del sistema nervioso central sintetizando un precursor de la sustancia amiloide, una molécula que, cuando se escinde, da lugar a la sustancia amiloide beta. Además, el estudio de células en cultivo ha demostrado que la interleucina-1 insta a otras células, entre las que posiblemente se cuenten las neuronas, a producir moléculas precursoras de la sustancia amiloide. Por último, las especies reactivas de oxígeno sintetizadas por la microglía activada promueven la agregación de los fragmentos de la sustancia amiloide.

Resulta fácil imaginar que, instalada la microglía en un estado hiperactivo, se cree un círculo vicioso. Si las células sintetizaran la proteína precursora de la sustancia amiloide, sus proteasas podrían cortar la molécula generando la sustancia amiloide beta. Al mismo tiempo, la interleucina-1 podría instar a otras células a fabricar también sustancia amiloide. Las especies reactivas de oxígeno podrían promover entonces la asociación de la sustancia amiloide liberada por la microglía o por las células vecinas. La formación de estos cúmulos podría, a su vez, dar lugar a la activación de nuevas células de la microglía, una mayor producción de sustancia amiloide, la formación de más placas, y así sucesivamente.

En el cerebro de las personas con síndrome de Down aparecen, mucho antes que en los pacientes de

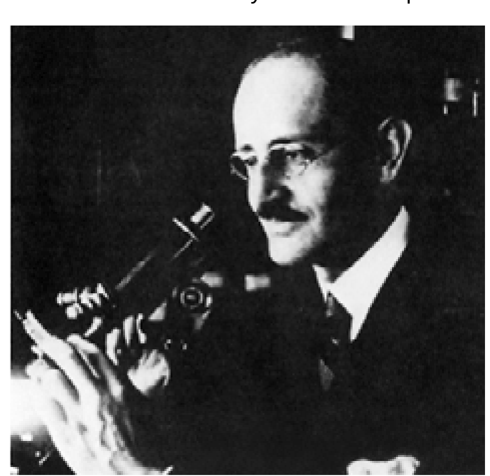
Origen controvertido de la microglía

En 1932 Pío del Río Hortega provocó con sus trabajos un debate en el que se han visto implicados cuantos se han interesado por la microglía, y que ha durado más de medio siglo. En el mismo artículo en que atribuía a la microglía una función inmunitaria y de limpieza del sistema nervioso central, sugería que no se originaba en el mismo tejido embrionario —el ectodermo— del que nacen las células nerviosas. Para él, la microglía derivaba del mesodermo, capa de células embrionarias que da origen a la médula ósea, la sangre, los vasos sanguíneos y linfáticos. No pudo decidir, sin embargo, cuál era la estirpe mesodérmica precisa de las células de la microglía. ¿Descendían de los leucocitos monocitos, leucocitos que desde la sangre fetal emigran al cerebro y a la médula espinal? ¿O descendían de unos parientes cercanos de los monocitos que emigraron al sistema nervioso central directamente, sin pasar por la circulación sanguínea?

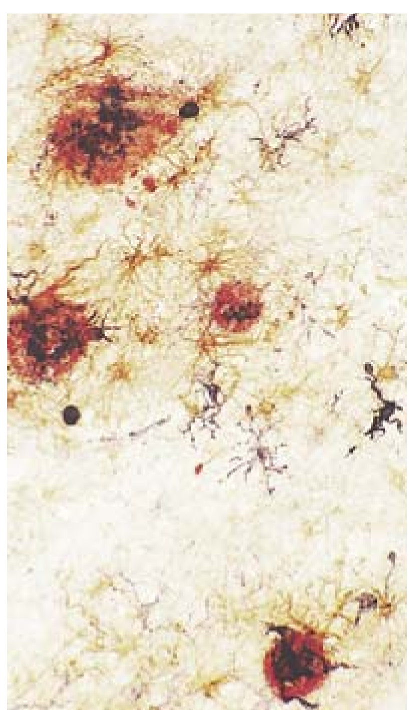
Durante algún tiempo se aceptó el origen monocitario. Afirmábase que los precursores de la microglía eran monocitos atraídos hacia el sistema nervioso en desarrollo por neuronas que morían durante el período de formación del cerebro y la médula espinal. Pero los nuevos descubrimientos contradijeron esa hipótesis. Jutta Shnitzer y Ken W. S. Ashwell demostraron que la retina del ojo, una parte del sistema nervioso central, está “sembrada” de células de microglía en épocas muy tempranas de su desarrollo, mucho antes de que empiece a producirse la muerte de las neuronas. La opinión de la mayoría se inclina ahora por la hipótesis del “parentesco cercano”.

Hizo la fotografía de la izquierda Wilder G. Penfield en 1924.

W.S. y C.K.-C.



Pío del Río-Hortega



Productos de la microglía: espadas de doble filo

Producto	Efectos beneficiosos	Efectos nocivos
Proteína precursora de la sustancia amiloide	Desconocido	Cuando se hidroliza puede dar lugar a la sustancia amiloide beta
Citocinas (moléculas mensajeras del sistema inmunitario)	Reclutamiento de otras células para los lugares de la infección; algunas contribuyen a la supervivencia y reparación de los astrocitos; otras combaten los tumores	Dañan células sanas e instan a otras células inmunitarias a segregar sustancias nocivas para las células
Factores de crecimiento	Favorecen la supervivencia y reparación de neuronas	Desconocidos
Enzimas proteolíticas	Contribuyen a la degradación de bacterias y otras células lesionadas	Degradan membranas de células sanas; podrían contribuir a la formación de la sustancia amiloide beta
Especies reactivas del oxígeno	Provocan alteraciones en membranas, proteínas y ADN de bacterias	Dañan células sanas; promueven la agregación de la sustancia amiloide beta

2. PLACAS SENILES (*regiones redondeadas en la micrografía*). Se las considera responsables de las lesiones neuronales que subyacen en las alteraciones de la memoria que padecen los enfermos de Alzheimer e individuos con síndrome de Down. La región central de las placas está constituida por fragmentos de proteína, la llamada sustancia amiloide beta (*rojo*), nociva para las neuronas, y la microglía (*púrpura intenso*). Las placas incluyen también otras células de la glía llamadas astrocitos (*"estrellas" de color marrón dorado*), así como axones y dendritas lesionados (*no visibles*). Según la investigación reciente, la microglía promueve la formación de las placas. Es posible también que la microglía activada destruya directamente neuronas, mediante la secreción de sustancias citotóxicas (*tabla*).

Alzheimer, numerosas placas seniles. Los cambios que se operan en ambas condiciones son muy similares. El grupo de Kincaid-Colton ha comenzado a explorar la posibilidad de que la microglía dañe el tejido cerebral de esos enfermos, tomando por animales de experimentación ratones portadores de un defecto genético análogo al responsable del síndrome de Down. La microglía de sus fetos es muy abundante y extraordinariamente reactiva; además, en los ratones desarrollados, libera especies reactivas de oxígeno, interleucina-1 y otras citocinas en cantidades elevadas.

En otro orden, las víctimas de un infarto cerebral podrían perder neuronas por culpa de un celo excesivo de su microglía, según se desprende de experimentos realizados en ratas por el grupo del otro autor (Streit). Cuando se obstruye un vaso sanguíneo importante que riega el prosencéfalo, el tejido cerebral dependiente de ese vaso muere. En el curso de los días siguientes, mueren también ciertas neuronas de una parte del área que la rodea, la región CA1 del hipocampo. La microglía se activa escasos minutos después de haberse iniciado el infarto cerebral, mucho antes de que mueran las neuronas del hipocampo. (Esta activación se aprecia en los cambios morfológicos y en la intensidad de la tinción.) Quizá la microglía, al sentir el peligro, intente proteger las neuronas, iniciando o aumentando la secreción de factores de crecimiento capaces de restañar las lesiones. Pero pudiera suceder también que la química alterada en la región acabe aflojando los frenos sobre el comportamiento de la microglía, impulsando las células hacia un estado en que ya serían peligrosas.

Contamos ya con indicios de la participación de la microglía en el desarrollo de la esclerosis múltiple, la enfermedad de Parkinson y la esclerosis lateral amiotrófica (enfermedad de Lou Gehrig). La microglía cambia también con la edad, como muestra el despliegue creciente del antígeno principal de histocompatibilidad. Este despliegue podría indicarnos que las inhibiciones normales interpuestas en el camino hacia un estado hiperactivo y peligroso se relajan con el tiempo. La relajación de estos controles promovería la destrucción neuronal, con la merma consiguiente de memoria y progreso de la senilidad.

Ahora bien, si la microglía ocupa un lugar central en la patogenia de enfermedades neurológicas, su inhibición específica y el bloqueo de los productos que sintetiza podrían abrir una puerta a la esperanza. Así confiados, ha comenzado el ensayo experimental de fármacos contra la enfermedad de Alzheimer. Para examinar la efectividad y la ausencia de efectos tóxicos, se está probando, en pequeña escala, un agente antiinflamatorio capaz de atenuar la hiperactivación de la microglía. Por no hablar del aprovechamiento de la vertiente protectora de estas células para potenciar la síntesis de factores de crecimiento.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FUNCTIONAL PLASTICITY OF MICROGLIA: A REVIEW. W. J. Streit, M. B. Graeber y G. W. Kreutzberg en *Glia*, vol. 1, n.º 5, págs. 301-307; mayo de 1988.

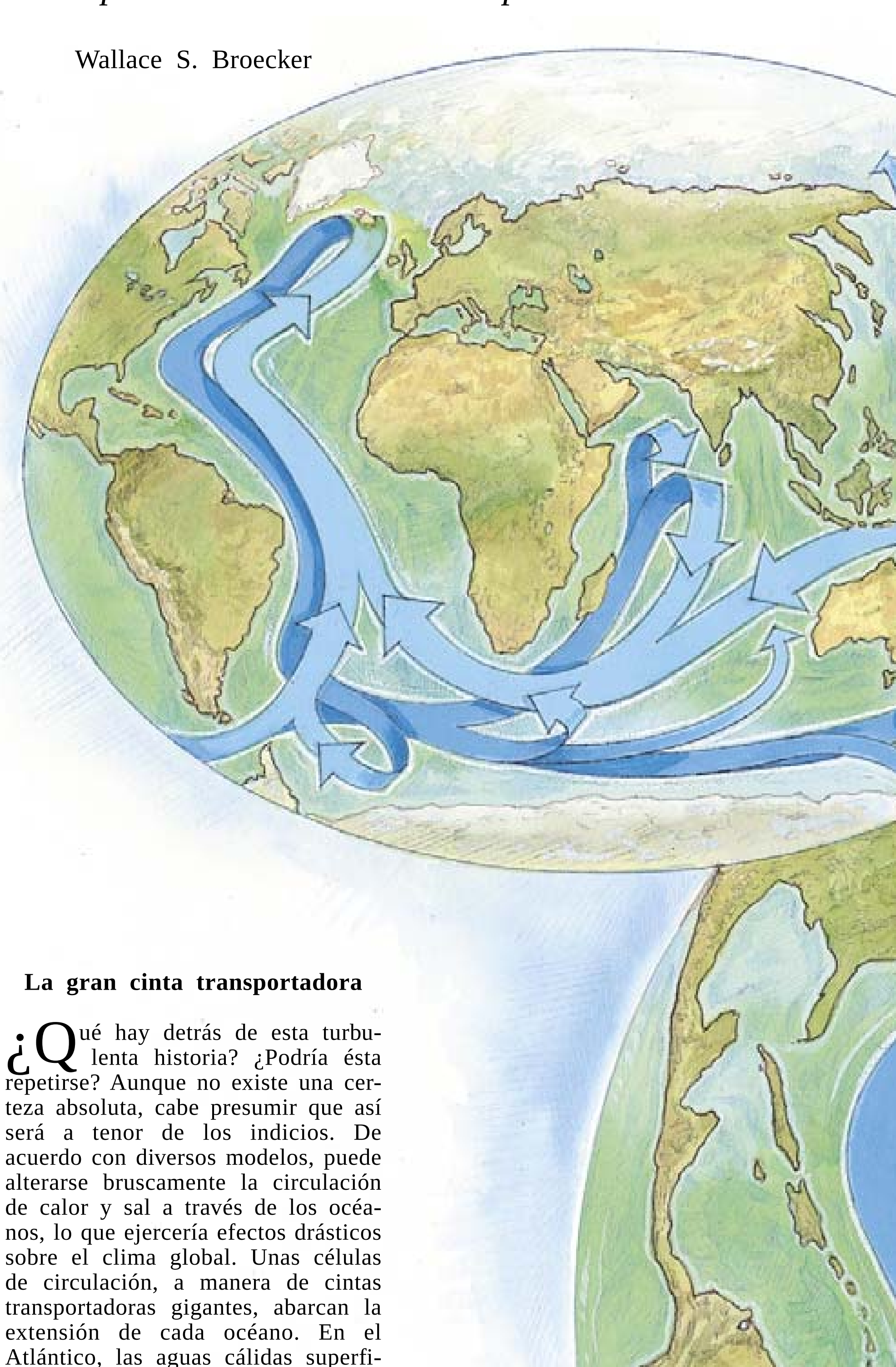
MICROGLIA. Número especial de *Glia*. Dirigido por M. B. Graeber, G. W. Kreutzberg y W. J. Streit. vol. 7, n.º 1; enero de 1993.

NEUROGLIA. Dirigido por H Kettenmann y B. R. Ransom. Oxford University Press, 1995.

Clima caótico

Se sabe que la temperatura global de la Tierra experimenta cambios notables en intervalos de diez a veinte años. ¿Nos hallamos en las puertas de uno de esos episodios?

Wallace S. Broecker



Los últimos 10.000 años constituyen una rareza en la historia del planeta. Este período, durante el cual se desarrollaron las civilizaciones, se ha caracterizado por un tiempo más benigno y menos variable que cualquier otro intervalo similar transcurrido durante los últimos cien milenios. Los testigos, o cilindros de hielo, extraídos de diversos puntos del casquete helado de Groenlandia muestran una serie de bruscas olas de frío y períodos cálidos —de 1000 años o más de duración— que hicieron descender o subir la temperatura media invernal en Europa septentrional hasta 10 grados Celsius en el curso de intervalos temporales brevísimos, de sólo un decenio. Los signos de esas bruscas variaciones se hallan escritos en los archivos de polvo atmosférico, concentración de metano y precipitación conservados en las capas anuales de hielo.

El último período frío duró un milenio. La Joven Dryas, así se le llama en referencia a una flor de la tundra que medró mucho por entonces, acabó hace unos 11.000 años. Dejó sus huellas en los sedimentos marinos del Atlántico Norte, en las morrenas glaciales de Escandinavia e Islandia y en los lagos y pantanos marítimos canadienses y de Europa septentrional.

Abundan las pruebas del alcance global que adquirieron los efectos de la Joven Dryas. El calentamiento postglacial de la meseta polar antártica se detuvo hace 1000 años; al mismo tiempo, avanzaron de forma espectacular los glaciares de las montañas de Nueva Zelanda y cambiaron notablemente las proporciones de especies planctónicas de la porción meridional del mar de la China. El contenido de metano en la atmósfera bajó en un 30 por ciento. Sólo en los archivos de polen de distintas zonas de los EE.UU. no se aprecia el impacto del período.

La gran cinta transportadora

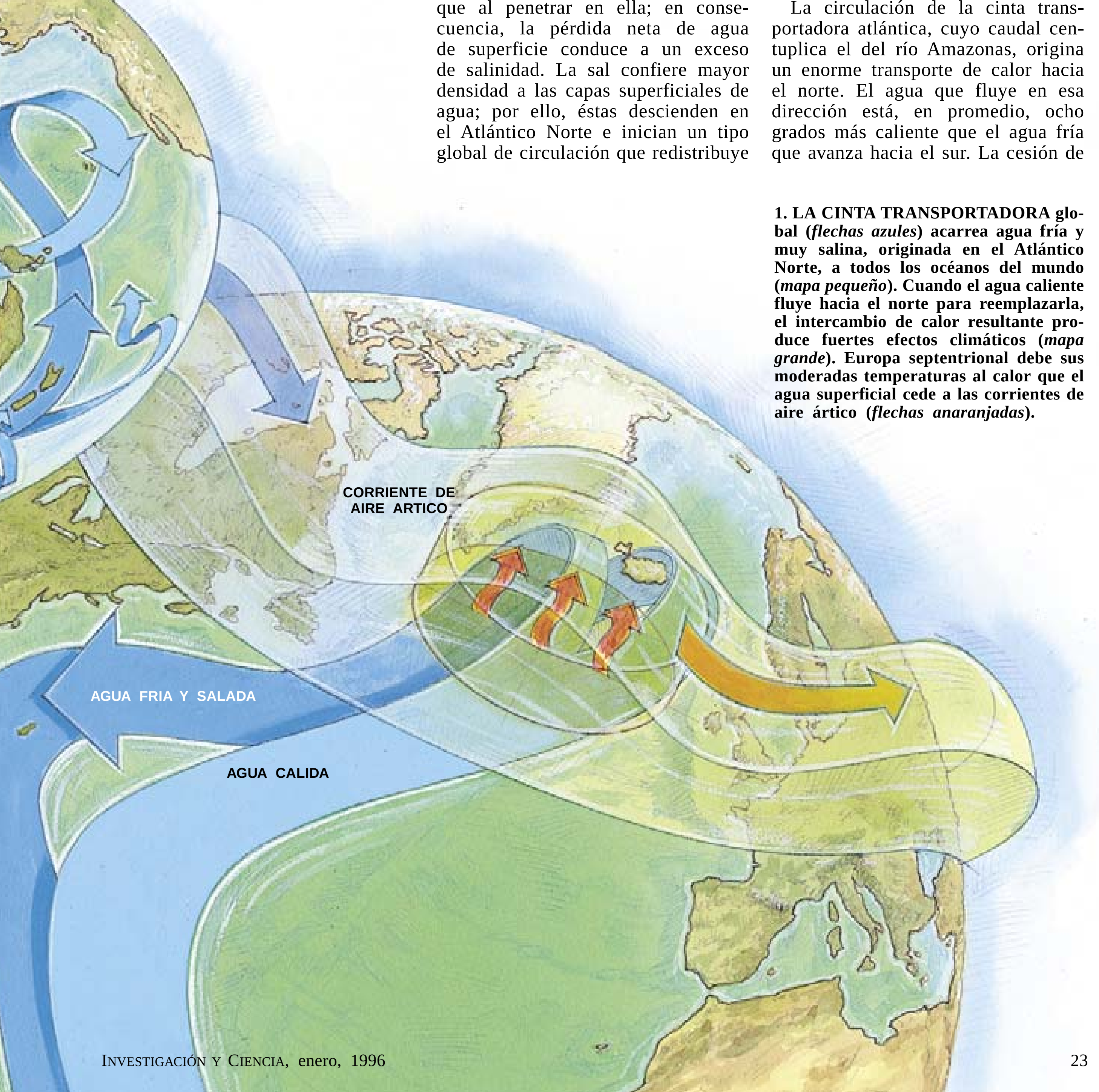
¿Qué hay detrás de esta turbulenta historia? ¿Podría ésta repetirse? Aunque no existe una certeza absoluta, cabe presumir que así será a tenor de los indicios. De acuerdo con diversos modelos, puede alterarse bruscamente la circulación de calor y sal a través de los océanos, lo que ejercería efectos drásticos sobre el clima global. Unas células de circulación, a manera de cintas transportadoras gigantes, abarcan la extensión de cada océano. En el Atlántico, las aguas cálidas superficiales viajan hacia el norte, llegando a la vecindad de Groenlandia, donde

el aire ártico las enfría; se sumergen y forman una corriente que recorre el Atlántico hasta el Océano Glacial Antártico. Allí, esta corriente, al ser más cálida y por tanto menos densa que las frígidas aguas superficiales, asciende de nuevo, se enfría hasta el punto de congelación y se hunde nuevamente en el abismo. Algunas lenguas del agua antártica de fondo, la más densa del mundo, fluyen en dirección norte hasta los océanos Atlántico, Pacífico e Indico, aflorando de nuevo para repetir el ciclo. En los océanos Pacífico e Indico, el movimiento hacia el norte de las aguas profundas queda compensado por un movimiento hacia el sur de las superficiales. En el Atlántico, esta contracorriente hacia el norte se incorpora rápidamente en el seno de la corriente hacia el sur, mucho más vigorosa, de la cinta transportadora.

Esta agua profunda se forma en el Atlántico Norte —pero no en el Pacífico— porque la salinidad de las aguas superficiales del Atlántico es mayor, en varios puntos porcentuales, que la de las aguas del Pacífico. La posición de las grandes cordilleras de ambas Américas, Europa y Africa genera circulaciones atmosféricas que hacen que el aire que abandona la cuenca atlántica esté más húmedo que al penetrar en ella; en consecuencia, la pérdida neta de agua de superficie conduce a un exceso de salinidad. La sal confiere mayor densidad a las capas superficiales de agua; por ello, éstas descienden en el Atlántico Norte e inician un tipo global de circulación que redistribuye de manera efectiva la sal en todos los océanos del mundo.

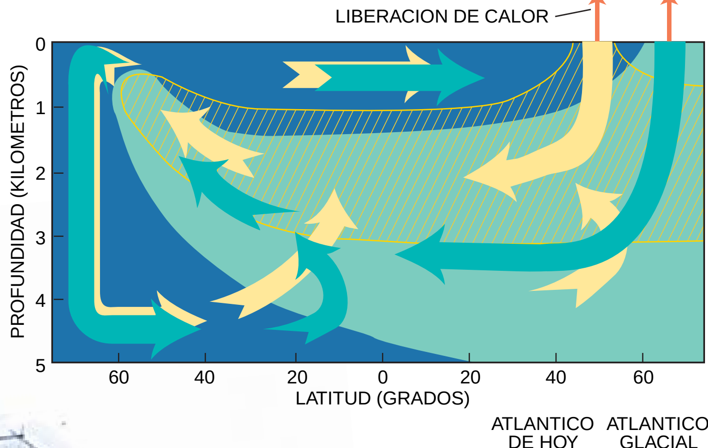
WALLACE S. BROECKER ha venido estudiando el cambio climático y la circulación oceánica desde hace más de 40 años. Enseña geología en el Observatorio Terrestre Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, donde obtuvo el doctorado en 1958. Broecker, que introdujo el análisis radioquímico e isotópico del agua del mar, ha dedicado los últimos diez años a investigar la estabilidad de los mecanismos que condujeron a la formación de las aguas profundas en el Atlántico septentrional.

La circulación de la cinta transportadora atlántica, cuyo caudal centuplica el del río Amazonas, origina un enorme transporte de calor hacia el norte. El agua que fluye en esa dirección está, en promedio, ocho grados más caliente que el agua fría que avanza hacia el sur. La cesión de



1. LA CINTA TRANSPORTADORA global (*flechas azules*) acarrea agua fría y muy salina, originada en el Atlántico Norte, a todos los océanos del mundo (*mapa pequeño*). Cuando el agua caliente fluye hacia el norte para reemplazarla, el intercambio de calor resultante produce fuertes efectos climáticos (*mapa grande*). Europa septentrional debe sus moderadas temperaturas al calor que el agua superficial cede a las corrientes de aire ártico (*flechas anaranjadas*).

2. EL TRANSPORTADOR AUXILIAR (*abajo*) propuesto por Stefan Rahmstorf, de la Universidad de Kiel, operaría a la latitud de Europa meridional y, por tanto, no cedería calor a los vientos del Atlántico Norte. Las temperaturas reinantes en Europa durante los períodos glaciales, cuando funcionaría esa cinta auxiliar, eran en promedio hasta 10 grados inferiores a las actuales. El transportador auxiliar se caracterizaba por una circulación más somera (*derecha*).



CORRIENTES DE AIRE ARTICO
AGUA FRIA Y SALADA
AGUA CALIDA

este calor a las masas de aire ártico sobre el Atlántico Norte explica el clima anómalo, por templado, de que disfruta Europa.

Se trata, sin embargo, de un mecanismo vulnerable, que podría arruinarse con inyecciones de un exceso de agua dulce en el Atlántico Norte. A altas latitudes, la precipitación y la escorrentía continental exceden a la evaporación, por lo que la salinidad de las aguas superficiales del Atlántico Norte depende de la rapidez con que la cinta transportadora se lleva el exceso de agua dulce aportado por la lluvia y los ríos. Cualquier interrupción del sistema transportador tendería a perpetuarse. Si el mecanismo transportador se detuviera, la temperatura del Atlántico Norte y tierras aledañas caería bruscamente cinco grados o más. Dublín sufriría el clima de Spitzberg, enclave siberiano situado a sólo 1000 kilómetros del círculo polar. Además, el cambio se produciría en 10 años, como mucho. (Los testigos de hielo y otros archivos sugieren que la temperatura media en toda la cuenca del Atlántico Norte descendió unos siete grados en pretéritas olas de frío.)

Según los modelos sobre el comportamiento del océano, la cinta transportadora tornaría a ponerse en funcionamiento, aunque habrían de transcurrir antes cientos o miles de años. El calor cedido hacia abajo desde las capas cálidas de la superficie del mar y la difusión de la sal marina desde el fondo hasta la superficie reducirían con el tiempo la densidad del agua profunda rebalsada hasta el punto en que las aguas superficiales de una u otra de las regiones polares podrían de nuevo penetrar hacia el abismo, restableciendo la circulación de calor y sal. La configuración de esta circulación rejuvenecida no tendría, sin embargo, por qué ser la misma que existía antes del paro. Dependería, por contra, de la forma peculiar en que se desarrollara la aportación de agua dulce en cada región polar.

En un modelo más reciente, Stefan Rahmstorf, de la Universidad de Kiel, sugiere que a la detención del sistema transportador primario podría seguir la creación de un sistema distinto de circulación que operase a profundidades menores, y en el que las aguas profundas no se formarían cerca de Groenlandia sino al norte de las Bermudas. Semejante alteración provocaría que el calor liberado resultara mucho menos eficaz en el proceso de calentamiento de Europa septentrional. El transportador superficial de Rahmstorf se bloquearía con una entrada brusca de agua dulce, lo mismo que el primario, aunque su modelo predice una reactivación espontánea al cabo de sólo algunos decenios. No está claro, sin embargo, el mecanismo mediante el cual la circulación oceánica podría retornar desde el transportador superficial al más profundo, tal como está funcionando hoy día.

Dos propiedades del modelo de Rahmstorf han llamado la atención de los paleoclimatólogos. En primer lugar, la corriente superficial del transportador auxiliar reproduce la distribución de isótopos de cadmio y carbono del período glacial que ha quedado aprehendida en las conchas de foraminíferos del bentos. Las aguas

de la cinta transportadora del Atlántico Norte son hoy pobres en cadmio y ricas en carbono 13, mientras que las aguas más profundas en el resto del océano son ricas en cadmio y pobres en carbono 13.

Este contraste refleja que la respiración de los organismos marinos retrae carbono 13 y favorece la concentración de cadmio (y otros componentes cuya historia no queda registrada en las conchas bénticas). Durante los episodios de frío, los niveles de cadmio descendieron en las aguas atlánticas de profundidades intermedias y subieron espectacularmente en las aguas de fondo; la relación de carbono 13 a carbono 12 mostró una variación opuesta, acorde con la conclusión de Rahmstorf según la cual la cinta transportadora funcionaba a menores profundidades y cortocircuitaba las aguas abisales.

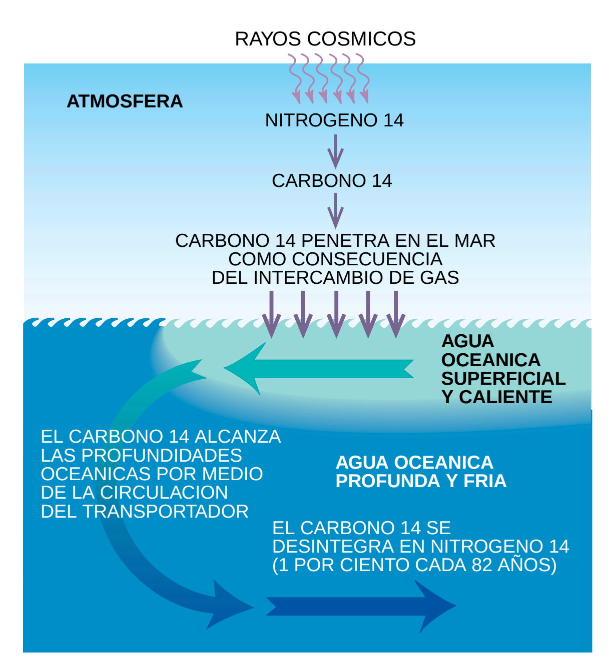
En segundo lugar, el transportador auxiliar mantiene el movimiento del radiocarbono hacia las profundidades marinas. Si este intercambio hubiera cesado, los métodos de datación radioquímica basados en la desintegración del carbono 14 mostrarían enormes distorsiones. Y es cierto que el reloj de radiocarbono se ha calibrado por otros medios y se ha comprobado que, pese a su imperfección, mantiene básicamente su validez.

Sólo alrededor de una cuarta parte del carbono mundial reside en las capas superficiales del océano y en la atmósfera. El resto está en el abismo. La distribución del carbono 14 radiactivo, que se forma en la atmósfera por la acción de los rayos cósmicos, depende de la intensidad de la circulación oceánica. En el océano, la mayor parte del radiocarbono que alcanza las profundidades abisales lo hace por medio de la circulación del transportador atlántico. Durante su viaje Atlántico arriba, las aguas del brazo superior y cálido de la cinta transportadora absorben radiocarbono del aire. La cinta transportadora lo acarrea luego hasta las profundidades oceánicas. Aunque el agua profunda vuelve brevemente a la superficie en la vecindad del continente antártico, allí apenas se disuelve radiocarbono.

De todo ese cuadro cabe inferir que basta un ligera deceleración en la marcha de la cinta para producir un efecto significativo en la concentración de carbono 14 en la atmósfera y en el océano. La proporción de carbono 14 a carbono 12 estable en las profundidades oceánicas se cifra hoy en torno a un 12 por ciento menor que el promedio para la superficie oceánica y la atmósfera; culpable de ello es la desintegración radiactiva que tiene lugar mientras circula el agua profunda. Paralelamente, los rayos cósmicos reponen un 1 por ciento de las existencias de radiocarbono en el mundo cada 82 años. Por consiguiente, si cesaran los intercambios entre la superficie y las profundidades oceánicas, la tasa de carbono 14 en el océano superficial y la atmósfera aumentaría a razón de un 5 por ciento cada siglo porque se iría añadiendo carbono 14, pero no se arrastraría hacia las profundidades oceánicas. Después de un milenio de aislamiento, la concentración atmosférica de carbono 14 habría aumentado en un tercio de su valor original.

Tal suceso conduciría a una alteración radical del registro de datación por radiocarbono. Los paleontólogos determinan la edad de los materiales orgánicos midiendo su contenido residual de carbono 14. La cuantía asimilada por un vegetal depende de la proporción de radiocarbono atmosférico (u oceánico) en esa época; cuanto menos carbono 14 quede, tanto más antigua debe ser la muestra. Las plantas que crecieron durante una interrupción de la operación de la cinta incorporaron el carbono 14 extra y parecen más modernas de lo que en realidad son. Después, cuando el transportador arrancó de nuevo y acarreó el carbono 14 atmosférico hasta cerca de su nivel actual, la anomalía se desvaneció. Así, las plantas de épocas frías parecen, según la datación por radiocarbono, contemporáneas de las muestras correspondientes al período cálido, que vivieron más de 1000 años después.

Aunque la concentración atmosférica de carbono 14 ha variado algo a lo largo del tiempo, las secuencias de fechas mediante radiocarbono relativas a sedimentos marinos que se han ido acumulando a velocidad casi constante demuestran que no se produjo tal perturbación brusca a lo largo de los últimos 20.000 años. Además, contamos con las mediciones realizadas en corales cuyas edades absolutas se han establecido mediante el método de datación por uranio-torio; nos indican que, durante el final del último período glacial, cuando el transportador debería haber reanudado su funcionamiento e iniciado su extracción de carbono 14 de la atmósfera, aumentó la concentración atmosférica de radiocarbono.

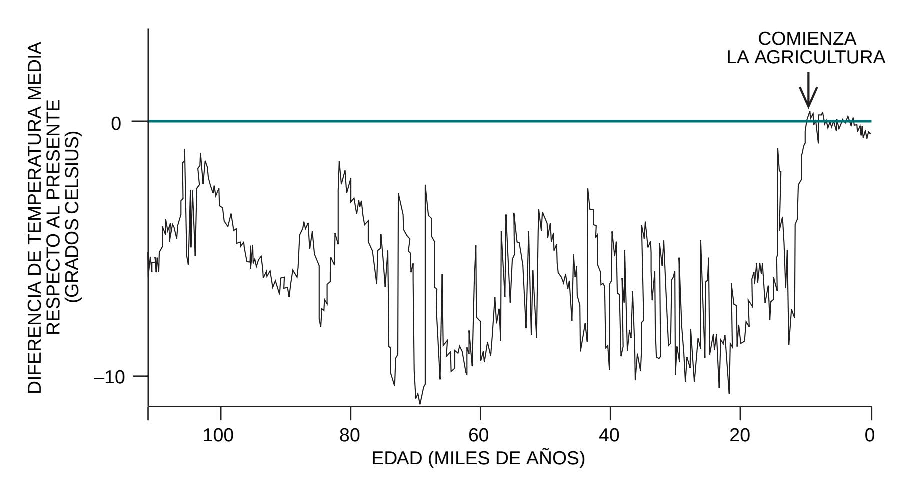


3. EL PROCESO DE FORMACION de las aguas profundas extrae carbono 14 radiactivo, formado por los rayos cósmicos, de la atmósfera y capa superficial del océano para transportarlo hasta profundidades abisales. La datación por el método del radiocarbono mide indirectamente el estado del transportador oceánico; en efecto, cualquier paro prolongado causa un enriquecimiento de carbono 14 en la atmósfera y trastorna las edades aparentes de los residuos orgánicos.

Una flota de grandes témpanos

¿Qué nos dicen todas esas indicaciones del registro? Dos cosas: todas las paradas de la cinta duraron poco, no más de un siglo, y esas interrupciones se vieron compensadas por intervalos intermedios de rápida mezcla. En particular, la Joven Dryas fue, al parecer, una época en que la circulación general oceánica aumentó y no disminuyó, como sería de esperar si la ola de frío la hubiera provocado una parada completa del transportador atlántico. Si éste realmente se paró, debió entrar en funcionamiento algún otro mecanismo capaz de arrastrar carbono 14 hasta las profundidades oceánicas.

Suponiendo que las variaciones experimentadas por el mecanismo







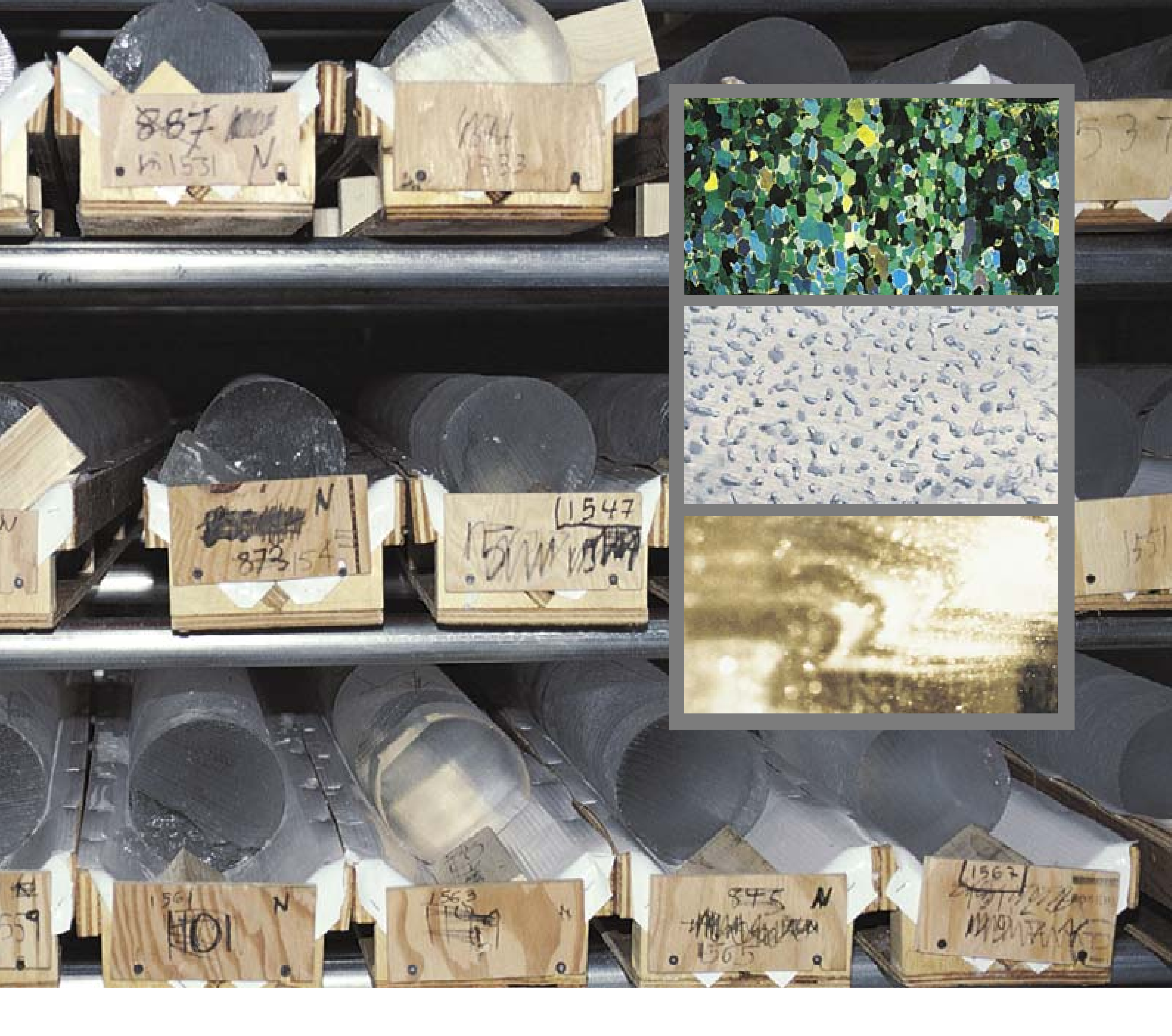
4. LOS TESTIGOS DE HIELO (*arriba, a la izquierda*) muestran la variabilidad del clima en los últimos 100.000 años. Se han realizado perforaciones hasta el lecho rocoso en la vecindad del centro del casquete de hielo groenlandés (*arriba*) y se ha medido la concentración relativa de oxígeno 18 y oxígeno 16. (*Las muestras por analizar se ven en una cámara refrigerada a la derecha.*) La cantidad de oxígeno 18 en el vapor de agua atmosférico depende de la temperatura del aire: cuanto más frío sea el clima, menos agua habrá que contenga el isótopo pesado. La imagen obtenida al microscopio de una sección del testigo (*arriba, a la derecha*) saca a la luz los distintos cristales de hielo mediante su diferente transmisión de la luz polarizada; las burbujas de aire aprisionadas registran la composición de la atmósfera (*centro, derecha*). El movimiento del casquete de hielo sobre un suelo irregular distorsiona las capas inferiores (*abajo, derecha*), lo que dificulta la obtención de mediciones precisas.

transportador produjeron los bruscos cambios hallados en los testigos de hielo de Groenlandia y en otros archivos climáticos, ¿de dónde saldría el exceso de agua dulce necesario para interrumpir el transporte de agua hacia las profundidades? Los casquetes de hielo polares son las fuentes obvias de las cataratas de agua dulce necesarias para alterar la circulación oceánica. Además, las variaciones bruscas parecen estar confinadas a épocas en que grandes capas de hielo cubrían el Canadá y Escandinavia. Desde el final de los períodos glaciales, el clima mundial ha permanecido encerrado en su modo actual.

De acuerdo con los datos disponibles, hubo por lo menos ocho invasiones de agua dulce en el Atlántico Norte: siete flotas de témpanos desprendidos del margen oriental de la capa de hielo de la bahía de Hudson y una inundación de agua de fusión de hielos procedente de un lago enorme que delimitaba el borde meridional de la capa de hielo durante la retirada de ésta. A principios de los años ochenta, siendo alumno de segundo ciclo en la Universidad de Göttingen, Hartmut Heinrich descubrió un curioso conjunto de capas en los sedimentos del Atlántico Norte. Las capas se extienden desde el mar del Labrador hasta las Islas Británicas. Según la explicación más plausible de sus características, débense a la fusión de numerosísimos témpanos desprendidos en el Canadá.

Los residuos procedentes de esta flota pierden potencia en dirección Este; su grosor de medio metro en el mar del Labrador se reduce a centímetros en el Atlántico oriental. La mayoría de las macropartículas de los sedimentos están constituidas por fragmentos característicos de arcillas sedimentarias y lechos de rocas ígneas procedentes de la bahía de Hudson y aledaños. Escasean las conchas de foraminíferos en estas capas, señal de que nos hallamos ante un océano cubierto de hielo marino; la baja relación de oxígeno 18 a oxígeno 16 en las conchas ofrece una inequívoca indicación de que los animales vivían en aguas mucho menos saladas de lo usual. (La lluvia y la nieve a altas latitudes son pobres en oxígeno 18 porque el agua “pesada” que lo contiene se condensa preferentemente en la atmósfera al enfriarse las masas de aire.)





La octava invasión de agua dulce procedió del lago Agassiz, aprisionado en la depresión topográfica producida por el peso de la masa de hielo en regresión. Inicialmente, el agua del lago inmenso vertía desde una terraza rocosa a la cuenca del río Mississippi y de allí al golfo de México. Hace unos 12.000 años, la retirada del frente de hielos abrió un canal hacia el este, desencadenando una caída del nivel del lago catastrófica. El agua liberada inundó el sur del Canadá hasta el valle ocupado hoy por el río San Lorenzo y desembocó directamente en la región donde ahora se forman las aguas profundas.

La vinculación de estos sucesos con los cambios climáticos locales no admite dudas. Cuatro de ellos acontecieron en épocas de cambios importantes en el clima de la cuenca del Atlántico Norte. Una de las capas de Heinrich señala el final del ciclo glacial que fue el segundo en duración y otra la del ciclo más reciente. Una tercera capa parece coincidir con el comienzo de las condiciones glaciales del Atlático Norte; por su lado, la invasión catastrófica de agua dulce procedente del lago Agassiz data del inicio de la Joven Dryas. Cada uno de los cuatro pulsos restantes da fin a un subciclo climático. Gerard C. Bond, del Observatorio Terrestre Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, correlacionó las capas de Heinrich con el archivo del testigo de hielo de Groenlandia y halló que los episodios fríos de un milenio de duración aparecen en grupos caracterizados por olas de frío de intensidad creciente, culminando en un suceso de Heinrich tras el cual se observa un calentamiento considerable que inicia un nuevo ciclo.

Las variaciones climáticas del período de la Joven Dryas dejaron su huella por doquier. ¿Podemos decir lo mismo de la quincena de episodios similares que le anteceden en el archivo del testigo de hielo? Aunque sólo tenemos dos pruebas que apuntan en esa dirección, ambas son sólidas. Jerome A. Chappellaz, del Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente de Grenoble, que analizó las burbujas de aire aprisionadas en los testigos de hielo de Groenlandia, descubrió que los períodos fríos iban acompañados de descensos en la concentración atmosférica de metano. Este gas se produce en ciénagas y











5. EL IMPACTO SOBRE EUROPA de una desorganización de la formación de aguas profundas traería consecuencias catastróficas. El verano de Dublin (*arriba, izquierda*) se parecería al que hoy vive Spitzberg, en el Artico lejano, y el invierno de Londres (*abajo, izquierda*) recordaría los actuales fríos del siberiano Irkutsk.

pantanos. Ahora bien, en la zona templada septentrional tales lugares estaban congelados o enterrados bajo el hielo durante las épocas glaciales; por consiguiente, el metano presente en la atmósfera debió de proceder de los trópicos. Las fluctuaciones en el archivo del metano revelan que los trópicos se secaban en los períodos fríos del norte.

La segunda prueba la recabaron James P. Kennet y Richard J. Behl, de la Universidad de California en Santa Bárbara, de un testigo de sedimento extraído de una profundidad de 500 metros bajo el nivel del mar en la cuenca de Santa Bárbara. Observaron bandas de sedimento sin perturbar en el que se distinguían capas anuales, alternando con secciones perturbadas por gusanos formadores de túneles. La presencia de tales organismos indica que el agua de fondo de aquella zona contenía una cantidad apreciable de oxígeno, suficiente para conservar la vida. Dichos períodos presentan una invariable correlación con épocas frías de Groenlandia, lo que implica que las variaciones experimentadas en la circulación oceánica abarcaban el planeta.

Mayor sorpresa reviste el comprobar que los episodios de Heinrich pudieron tener también alcance mundial. El grupo de Eric Grimm, del Museo estatal de Illinois, observó en muestras de polen extraídas de los sedimentos del lago Tulane, en Florida, un máximo destacado en la relación de pino a roble estudiada para cada episodio de Heinrich. Los pinos prosperan en climas húmedos, mientras que los robles prefieren entornos más secos. Aunque la relación exacta entre los intervalos ricos en pinos y los sucesos de Heinrich está pendiente de una datación más exacta mediante radiocarbono, el archivo del lago Tulane respalda la tesis de un intervalo húmedo por ciclo. El grupo de George H. Denton, de la Universidad de Maine, descubrió una vinculación entre fenómenos más alejados: cada uno de los cuatro episodios de Heinrich que caía dentro del dominio de la datación por radiocarbono correspondía a un máximo realzado de la extensión de los glaciares andinos.

La observación de que la creación y destrucción masiva de los glaciares canadienses afectó al globo entero plantea una paradoja. De acuerdo con los modelos atmosféricos, los cambios de clima relacionados con variaciones de la cantidad de calor cedida a la atmósfera en el Atlántico Norte afectarían sólo a las regiones circundantes. Pero las pruebas recogidas demandan un mecanismo que generalice esos efectos a los trópicos, las regiones templadas meridionales e incluso la región antártica.

La distribución simétrica de esos cambios climáticos alrededor del Ecuador apunta a los trópicos. Los cambios operados en la dinámica de la atmósfera tropical podrían producir efectos de vasto alcance. Las células convectivas de gran altura que se forman en la atmósfera tropical, donde se enfrentan los vientos alisios, alimentan la atmósfera con su gas de invernadero predominante: el vapor de agua. Pese a la levedad de la relación entre la circulación oceánica y la convección tropical, parece plausible que las variaciones en las características de la circulación alterasen la cantidad de agua fría que aflora en superficie a lo largo del Pacífico ecuatorial. Este afloramiento es una parte importante del balance de calor de la región y, por tanto, de su

clima general. La reducción de este afloramiento ecuatorial, como ahora sucede durante los episodios de El Niño, pueden producir sequías en unas regiones e inundaciones en otras.

Cambios globales

Tal supuesto viene apoyado no sólo por los datos de Chappellaz, que atestiguan la sequía en los trópicos, sino también la humedad en Nevada, Nuevo México, Texas, Florida y Virginia. La prueba más contundente proviene de la región de la Gran Cuenca del Oeste de los EE.UU.: inmediatamente después del último episodio de Heinrich, hace 14.000 años, el lago Lahontan de Nevada alcanzó su máxima extensión, un orden de magnitud superior al actual residuo. El mantenimiento de semejante masa de agua requiere cantidades ingentes de precipitación, del orden de las que se dieron durante el episodio cumbre de El Niño en el invierno de 1982-1983. Podríamos, pues, imaginarnos aquellos sucesos anteriores a la manera de cambios en la configuración de la circulación oceánica que originaron episodios de El Niño de 1000 años de duración.

Los descubrimientos recientes de Lonnie G. Thompson, de la Universidad estatal de Ohio, refuerzan la idea de que el tiempo tropical difirió drásticamente durante los períodos glaciales. Los antiguos testigos de hielo de más de 6000 metros procedentes de los Andes tropicales contienen 200 veces más polvo fino que las muestras más modernas: polvo probablemente transportado por vientos que soplaban desde la Amazonía, árida entonces. El hielo más antiguo es también pobre en oxígeno 18, si lo comparamos con el hielo formado hace menos de 10.000 años, lo que implica una temperatura 10 grados inferior a la actual. Junto con la observación de que la línea de nieves andina llegaba 1000 metros más cerca del nivel del mar durante los períodos glaciales, esos datos sugieren que los trópicos de las eras glaciales resultaban al propio tiempo más fríos y secos.

La conclusión de que el sistema climático de la Tierra saltó en ocasiones de un modo de operación a otro es, pues, sólida como una roca. Deben los investigadores identificar las causas de esos bruscos cambios. Aunque las reorganizaciones de la circulación oceánica en gran escala parecen el mecanismo verosímil, quizá podrían salir a la palestra mecanismos atmosféricos.

Un balance frágil

Tal situación nos deja a extramuros de la predicción climática. ¿Podría el actual aumento de la concentración de gases de invernadero instar otra reorganización de la cinta transportadora de aguas profundas y las situaciones meteorológicas de gran escala que de ella dependen? Por una parte, el archivo paleográfico sugiere que los saltos se dieron en épocas en que el Atlántico Norte estaba rodeado de enormes capas de hielo, circunstancia de la que ahora nos hallamos alejadísimos. Por otra parte, el impulso del invernadero promete ser mucho mayor que cualquier otro estímulo experimentado durante un intervalo interglacial, y no hay certeza de que el sistema permanezca encerrado en su modo actual, bastante benigno.

No hay razón para que se produzca ahora un paro de la cinta transportadora o un cambio radical de magnitud pareja. Pero si ello ocurriera, el impacto resultaría catastrófico. La probabilidad de un tal suceso será máxima de aquí a 50 o 150 años, cuando la población del planeta sufra la amenaza del hambre y las enfermedades, mientras se debate por conservar un entorno sujeto a una atosigante presión ambiental. Nos conviene tomar esta posibilidad en serio. No deberíamos ahorrar esfuerzo en el intento de comprender mejor el comportamiento caótico del sistema climático global.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

¿QUÉ MECANISMO GOBIERNA LOS CICLOS GLACIALES? Wallace S. Broecker y George H. Denton en *Investigación y Ciencia*, vol. 162, páginas 48-57; marzo, 1990.

EVIDENCE FOR GENERAL INSTABILITY OF PAST CLIMATE FROM A 250-KYR ICE-CORE RECORD. W. Dansgaard et al. en *Nature*, vol. 364, páginas 218-220, 15 de julio, 1993.

A LOW-ORDER MODEL OF THE HEINRICH EVENT CYCLE. D. R. MacAyeal en *Paleoceanography*, volumen 8, n.º 6, páginas 767-773; diciembre, 1993.

SYNCHRONOUS CHANGES IN ATMOSPHERE CH_4 AND GREENLAND CLIMATE BETWEEN 40 AND 8 KYR BP. J. Chappellaz, T. Blunier, D. Raynaud, J. M. Barnola, J. Schwander y B. Stauffer en *Nature*, vol. 366, págs. 443-445; 2 de diciembre, 1993.

Perfiles

Alina Quevedo

PEDRO PASCUAL: *Levadura de físicos*

Pedro Pascual, físico teórico de altas energías, mira por encima de unas gafas de edad indefinida. Inclina la cabeza, y tropiezo con los ojos brillantes que alivian la faz un tanto dura, barba sin recortar y talante severo. Recio, tiene un aire de caballero medieval. Pero los entuertos que desface tienen que ver con la estructura de la materia, en los límites en que las distancias se acortan por debajo del radio nuclear o se tornan cósmicamente enormes.

En el conocimiento de las fuerzas que actúan en tales intervalos se ha progresado con un objetivo: hallar la última, aquella en que todas fueran una y la misma. Primero se consiguió el electromagnetismo. Desde los años treinta disponemos de una teoría para describir las interacciones débiles, responsables entre otros fenómenos de la desintegración beta de los núcleos. Vino, a finales de los sesenta, la teoría electrodébil, que unificaba fuerzas electromagnéticas y débil, que opera a través del intercambio del fotón y de los bosones vectoriales, $W^{\pm}$ y Z^0, con masas del orden de 100 veces la que posee protón.

La estabilidad de los núcleos exige interacciones atractivas fuertes, capaces de compensar las electromagnéticas repulsivas de los protones. En los años setenta David Gross y otros crearon la cromodinámica cuántica, teoría que describe estas interacciones mediante el intercambio de gluones, de masa nula. Al igual que la teoría electrodébil, la cromodinámica cuántica ha cosechado muchos éxitos experimentales, pero los físicos no se sienten satisfechos con unas teorías donde existen más de una veintena de parámetros y a mucha gente no le satisface el mecanismo teórico aducido para explicar las masas del $W^{\pm}$ y del Z^0.

Pascual es un buen conversador que adereza una sutil lucubración teórica con lecturas o historias vividas. Recuerda el retrato de sus colegas que trazó N. Wiener, en 1956: “un físico moderno es un teórico cuántico los lunes, miércoles y viernes; un estudioso de la teoría relativista de la gravitación los martes, jueves y sábados. Los domingos reza a Dios y Le pide que alguien, preferiblemente él, encuentre la reconciliación de estas dos teorías.” Los físicos continúan soñando con una teoría cuántica de la gravedad y con lograr la unificación de todas las interacciones.



Retrato machadiano de Pedro Pascual

Ocupa un despacho huérfano de detalles personales. Si no fuera por la endeblez de las paredes, una reproducción de *las Meninas* en la versión gris de Picasso y un cartel de Iberdrola, diría que me encuentro en una celda monacal. Sólo un cenicero, de los de dos por veinte duros, repleto de colillas. También un árbol genealógico, realizado por íntimos colaboradores, que lleva fecha del 27 de abril de 1995, su sexagésimo primer cumpleaños. Con Pascual por tronco, extiende sus ramas a lo largo del tiempo y el espacio de la física teórica de altas energías en España.

De su experiencia en las aulas Pascual recuerda con especial agrado los años en que enseñaba mecánica cuántica en la Universidad de Valencia, donde estrenó cátedra en 1963. Tenía entonces 29 años y alternaba la enseñanza con la investigación ligada al CERN, el centro europeo de investigaciones nucleares con sede en Ginebra. Para los alumnos el nuevo catedrático imponía un ritmo vertiginoso. Los abrumaba por su uso generoso del signo de sumatorios. Les planteaba problemas que estimularan su imaginación: “Supóngase una enana blanca formada por átomos de helio totalmente ionizados. Las fuerzas gravitatorias que tienden a colapsar la estrella son contrarrestadas por la presión de degeneración de electrones. Un modelo simplificado puede construirse suponiendo que su densidad es uniforme y determinando el radio de forma que la suma de la energía gravitatoria de la estrella y la energía cinética de los electrones sea mínima. Determínese la relación entre la masa y el radio de la estrella. Supóngase que el gas de electrones está totalmente degenerado y es no-relativista.” La solución, según Pascual que es muy rápido, puede ser obtenida con facilidad por un alumno medio de la licenciatura.

“Pronto se habló de ‘La Pascualera’, para designar el vivero de teóricos de la Universidad de Valencia”, dice el físico José Bernabeu. Entonces, como

en los noventa en Barcelona, las lecciones de Pascual son de las que no se olvidan. "Puedes explicar bastante y con cierto rigor. El resultado es que los malos alumnos se desesperan y los buenos lo agradecen. Reconozco que soy intransigente. Me molesta que la gente que estudia no se dedique a ello. Pero no pretendo salvar sus almas." Su obra se prolonga en una copiosa producción bibliográfica de la que emerge una clásica *Mecánica cuántica*, escrita en colaboración con A. Garrido, traducida al inglés

Da fuego a su enésimo cigarrillo. En eso está cuando suena el teléfono. El catedrático responde enseguida. Emite una andanada de monosílabos que, de no conocerlo, tal vez dejarán de una pieza al interlocutor telefónico. Fulmina la conversación en una sumatoria exponencial de "sí", "no", "bueno", "sí", "sí", se despide, y, clic, cuelga.

Entre 1957 y 1963 la trayectoria investigadora de Pascual estuvo vinculada a la Junta de Energía Nuclear (JEN). "A principios de 1957 el profesor Carlos Sánchez del Río decidió, de acuerdo con José María Otero, que presidía el centro, formar un grupo de física teórica. Se concedieron cuatro becas a estudiantes que habían terminado recientemente su licenciatura. Este fue el inicio de la física teórica de altas energías en España."

"En la JEN, "los físicos de partículas éramos los mamíferos de lujo". En 1961 la Junta lo envió como becario de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), al Instituto de Estudios Nucleares Enrico Fermi, de la Universidad de Chicago.

Trabajó junto a Y. Nambu, un investigador al que Pascual admira. "Entre sus múltiples contribuciones se puede mencionar que en 1964, en colaboración con M. Y. Han, introdujo el concepto de color para los quarks. Ellos dieron a cada quark un nuevo número cuántico con tres valores posibles. El nuevo número cuántico lleva el nombre de color. Para los tres valores se adoptaron el rojo, verde y azul. Los antiquarks tienen anticolores que se representan por los complementarios cian, magenta y amarillo", se explaya en su inevitable vena pedagógica.

España se adhirió al CERN en 1962 y lo abandonó en 1968. Pascual fue nombrado, a título personal, representante de España en el Comité para Futuros Aceleradores (ECFA) y mantuvo el vínculo con el Laboratorio.

En su larga trayectoria investigadora ha saltado de un asunto a otro sin casarse con ninguno. Dirigió su atención hacia la rotura dinámica de simetrías, cuando trabajó en el Instituto Fermi. Pudo entonces quedarse en Estados Unidos. "Seguramente hubiera sido mejor físico. Pero no todo es la física. Quise regresar para hacer algo por promover la ciencia en España."

En la Universidad de Valencia se interesó por los problemas de interacción de las partículas con los núcleos atómicos, sobre todo en el estudio de sus interacciones electromagnéticas y débiles. Después exploró la teoría electrodébil. Luego fue evolucionando hacia los aspectos perturbativos de la cromodinámica cuántica. De estos asuntos pasó a aspectos no perturbativos. Su contribución más reciente, "Speed of light in non-trivial vacua" (*Velocidad de la luz en el vacío no trivial*), en colaboración con J. I. Latorre y Rolf Tarrach, que apareció en *Nuclear Physics* en 1995, unifica todos los resultados existentes sobre el cambio de velocidad de fotones debido a las modificaciones cuánticas del vacío.

Seguramente hubiera sido mejor físico (quedándome en Chicago). Pero no todo es la física. Quise regresar para hacer algo por promover la ciencia en España

El entiende, a diferencia de lo que opinan otros colegas, que para ser físico no hace falta una dosis adicional de inteligencia. "Hice física porque mi padre había hecho química. Estoy seguro de que como biólogo también me hubiera ido bien. La inteligencia necesaria no es tan distinta, tal vez el grado de abstracción y el poder de concentración. Pero los codos son muy importantes", afirma Pascual.

La concesión en 1986 del Premio Nacional de Investigación Santiago Ramón y Cajal, que compartió con Galindo, no le cogió pegado al teléfono esperando. "Había asistido a una conferencia en Mallorca. Estaba cenando en un restaurante, cuando me llamaron al teléfono. Eso me sobresaltó. Era mi mujer a la que alguien había informado del premio. Así me enteré. Luego, claro que sentí satisfacción."

"Tiene tal apego a la rectitud que a veces ser su amigo perjudica", dicen los que le conocen bien. Esta condición y el haber participado en la Comisión Nacional Evaluadora de la Actividad Investigadora de los docentes universitarios le han ganado adversarios y admiradores en un país pequeño como el nuestro. Habla de sus oponentes sin acritud. "La mitad de los catedráticos del país me odian", dice medio en broma, y a continuación afirma, "si hubiera puesto a mis hijos de catedráticos tendría un mal departamento. Hay gente que teme rodearse de quienes le puedan hacer sombra. Pero si estás seguro, te gusta tener cerca a alguien suficientemente bueno".

Una de las más recientes contribuciones de Pascual, junto con J.I. Latorre, es el Centro de Física de Benasque (CFB). "Ni en España ni en el resto de Europa existía un centro en el que los científicos se pudieran reunir a trabajar tranquilamente en un ambiente agradable. Un lugar de este tipo lleva muchos años funcionando en Aspen, Colorado." La primera reunión del CFB que carece de plantilla permanente, y en el que todos los investigadores que participan lo hacen en calidad de visitantes, tuvo lugar en julio de 1995. Se dedicó a cromodinámica cuántica y lagrangianos efectivos, aspectos fenomenológicos y desarrollos recientes en teoría cuántica de campos. El programado para este año abordará la teoría electrodébil y aspectos recientes de teoría cuántica de campos.

No duerme más de cinco horas. Y le gustan los libros de ensayo e historia. Para distraerse de su absorbente profesión confiesa, sin dar detalles, que investiga la historia de su familia. Parece que cuenta con mucho material. "Ya ha llegado al siglo XI", dice un colaborador suyo. Porque él no presume de su labor de búsqueda por pedanías y parroquias.

Su abuelo paterno era un panadero semianalfabeto afianzado en Montseny. De los cuatro hijos que tuvo, uno, José Pascual Vila, resultaría un brillante científico dedicado a la química, que tiene hoy dedicada una calle cerca de la facultad donde enseña su primogénito Pedro. Pascual Vila, que se doctoró en Madrid entre 1918 y 1919, había investigado en el campo de los ácidos biliares, durante su estancia en Alemania. "Cuando mi padre llegó a su plaza en Salamanca solicitó un laboratorio para trabajar. —Déjenlo. Es soltero, eso se le pasará, vaticinó un catedrático", recuerda Pedro. Este ha tenido seis hijos. "Uno ya no está aquí. Se fue." Y algo cambia en su expresión jovial.

Ciencia y sociedad

Neuroquímica

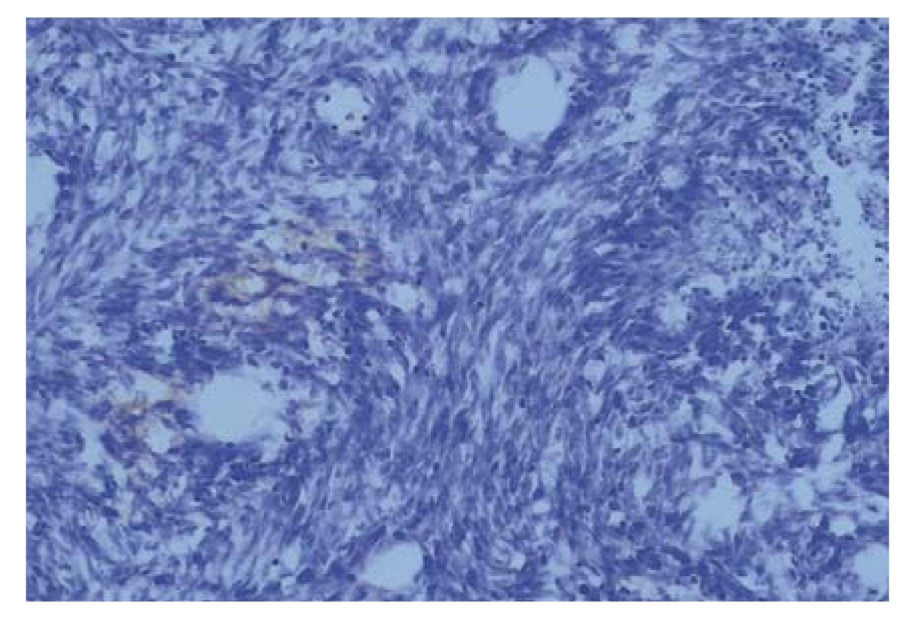
Destrucción de tumores cerebrales

Cerebro y médula espinal están formados por neuronas y células de la glía. El número de células gliales multiplica, de cuatro a diez veces, el de células nerviosas. Aunque imprescindibles para el funcionamiento normal del cerebro, las gliales son responsables también de que no puedan regenerarse el cerebro y la médula espinal lesionados. Por último, la mayoría de los tumores cerebrales son tumores de células gliales.

Desde hace años venimos estudiando el comportamiento químico de esas células. En 1988 descubrí que en el cerebro de los mamíferos hay sustancias que inhiben la mitosis, o división celular, de la glía. Las llamamos neurostatinas. Más recientemente, con J. Abad Rodríguez purificamos esas sustancias inhibidoras y hemos comprobado que, además de bloquear el proceso de división de la glía normal, impiden la mitosis de células gliales malignas.

En paralelo con esa línea de trabajo, hemos diseñado, sintetizado y ensayado, en colaboración con investigadores del equipo de carbohidratos del Instituto de Química Orgánica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, un grupo de oligosacáridos (polímeros de sacarosa) de poder inhibidor y estructura similares a la del inhibidor natural. Uno de esos compuestos sintéticos se ha ensayado en ratas a las que se transplantó tumores de glía. Para nuestra sorpresa, el oligosacárido no sólo retardó la progresión del tumor (metástasis), sino que lo destruyó, sin que quedaran afectadas las células gliales normales. En nuestra opinión, el inhibidor sintético provoca la aniquilación selectiva de la glía tumoral mediante la activación de las células asesinas (*natural killer*), pertenencientes al sistema inmunitario.

El interés de esa línea de investigación y de los hallazgos obtenidos es evidente, si caemos en la cuenta de que no existen métodos terapéuticos contra los cánceres de la glía. La profundización debería llevarnos al diseño y síntesis de una nueva serie de fármacos dotados de actividad antimitótica y antimetastática alta, específica y metabólicamente estables.



Células de glía tumoral de rata (línea C6 de glioma) proliferando en el hipocampo de una rata adulta, isogénica con las células tumorales. Obsérvese la formación de numerosos capilares sanguíneos, inducida por las células tumorales, alrededor de los cuales crecen las células del tumor

Hemos dicho que se trata de oligosacáridos. La estructura del oligosacárido más potente disponible hasta la fecha es la de un tetrasacárido, híbrido entre la estructura de los grupos sanguíneos A y Lewis X. Se sabe de oligosacáridos de ese tipo que actúan como ligandos de un grupo especial de lectinas dependientes de calcio, implicadas en el proceso de adhesión celular.

El que el tetrasacárido en cuestión ejerza una función antimitótica abona, pues, la hipótesis de la relación entre división celular, adhesión intercelular y migración celular, procesos que nunca hasta ahora se habían puesto en conexión. Relación que explica el bloqueo de la proliferación celular que tiene lugar cuando las células normales entran en contacto, así como la desaparición de dicho impedimento cuando las células se transforman en tumorales. Sugiere, por fin, de qué modo se instaura —o se bloquea— la metástasis tumoral.

MANUEL NIETO-SAMPEDRO
Depto. de Plasticidad Neural
Instituto Cajal, Madrid

Paleoantropología

¿Comienza Africa en los Pirineos?

Desde el hallazgo en 1982 en Venta Micena (Orce, España) de VM-0, un fragmento del hueso occipital de un homínido que, según algunos autores, pertenecía en realidad a un équido, las dudas persiguen a todos los artículos que se publican respecto de los diversos yacimientos de Orce. ¿Se trata realmente de restos de homínidos y herramientas o se ha cometido un trágico error?

Quince años después de los primeros hallazgos, la cuestión parece haber recibido una respuesta definitiva y convincente en la Conferencia Internacional de Paleontología Humana celebrada en Orce entre el 4 y el 7 de septiembre de 1995, con la participación, entre otros, de los profesores Emiliano Aguirre, J. M. Bermúdez de Castro, Günter BrŠuer,

Brunetto Chiarelli, Ronald Clarke, F. Clark Howell, Jerold Lowenstein, Ian Tattersall, Phillip Tobias y Milford Wolpoff. El propósito no declarado pero obvio de la conferencia era el de llevar a cabo un debate general acerca de los hallazgos de Orce, con el fin de obtener un reconocimiento de la comunidad paleontológica internacional.

Pero al margen de Orce, hubo sesiones dedicadas a otros yacimientos españoles como los de Cabezo Gordo (Murcia), Atapuerca (Burgos) y Laguna de Medina (Cádiz) para ayudar a establecer ciertas conclusiones generales acerca de los primeros homínidos de la península Ibérica. Como colofón lógico, hubo también relaciones sobre la presencia temprana de *Homo* en Europa (discutida a través de algunas comunicaciones de carácter teórico), con especial referencia a los hallazgos de Dmanisi (Georgia), Visogliano (Trieste) y Ubeidija (Valle del Jordán), junto a los de los yacimientos españoles (Atapuerca).

El principal objetivo de la conferencia de Orce se cumplió a la perfección. Jerold Lowenstein, de la Universidad de California en San Francisco, confirmó el carácter de homínidos de los restos de Venta Micena VM-0 (fragmento de occipital), VM-1960 (diáfisis humeral infantil) y VM-3961 (fragmento de húmero de un adulto). Esa confirmación se realizó mediante técnicas de radioinmunología, que comparan las reacciones de los restos minúsculos de proteínas existentes en los fósiles con los de distintas especies actuales. La conclusión de Lowenstein es que VM-0 "podría ser inequívocamente identificado como un homínido" y que VM-1960 y VM-3961 "dieron reacciones de albúmina homínida". Concepción Borja y Enrique García Olivares, de la Universidad de Granada, mediante técnicas similares, confirmaron que de los fósiles examinados VM-0 y VM-1960 eran definitivamente homínidos y VM-3961 estaba probablemente más cerca del género humano que de cualquier otro.

La conferencia de Orce eliminó, pues, cualquier duda, justificando la teoría de los que creyeron, desde el primer momento, en el carácter de homínido de VM-0. Pero en ella se ocultaba también una sorpresa capaz de superar, con mucho, las conclusiones acerca de los fósiles de Venta Micena. En el transcurso de una visita a los distintos yacimientos de Orce, algunos miembros del grupo de investigación dirigido por Josep Gibert (el descubridor de VM-0) comunicaron el hallazgo de varios restos, aún pendientes de publicar, en el yacimiento de Barranco León 5. Entre ellos estaba BL-0, un molar parcial de un homínido, y una considerable cantidad de fragmentos de industria lítica. Barranco León 5 tiene una edad estimada de 1,8 millones de años, lo que da a los homínidos de Orce el tan disputado últimamente título de "primer europeo".



Barranco León

Pero, ¿es esto así? Mientras los hallazgos de Barranco León 5 permanezcan inéditos, las únicas guías de que se dispone para juzgar sus méritos son las comunicaciones orales recibidas durante la visita al yacimiento y el examen que se realizó de los restos. BL-0 es un fragmento tan pequeño que resulta difícil sacar ninguna conclusión definitiva de él. Por lo que hace a las piezas de la industria lítica de Barranco León 5, que incluyen esquirlas y núcleos de pedernal probablemente manipulados *in situ*, parecen ser antiguas y prometedoras. La excavación de Barranco León 5 es tan sólo preliminar y se ha llevado a cabo hace muy poco tiempo (los trabajos últimos, con una área explorada muy pequeña, no se terminaron hasta 48 horas antes de que comenzase la conferencia de Orce). Así que hay posibilidades reales de que futuros hallazgos proporcionen datos más precisos acerca de la morfología de los homínidos de Orce y de sus tradiciones culturales.

Por lo que hace a la edad del yacimiento, será necesario aclarar algunos aspectos dudosos. En la visita a los distintos yacimientos, se nos habló de los estudios de la zona, que muestran la existencia de dos distintos episodios positivos paleomagnéticos: Olduvai (el más antiguo) y Jaramillo. La identificación de esos episodios se hizo mediante análisis de la microfauna. Así, Barranco León 5 parece pertenecer al límite inferior del subcrón Olduvai pero, hasta el momento, sólo ha sido datado mediante estratigrafía y comparaciones de la fauna. Los roedores (*Mymomis ostramosensis* principalmente) han proporcionado la prueba más sólida para llegar a la fecha estratigráfica de 1,8 millones de años. Pero, por otro lado, la macrofauna de Barranco León 5 incluye algunos excelentes especímenes, como una mandíbula de hipopótamo, que fueron considerados más jóvenes y, en todo caso, no más antiguos que 1,5 millones de años por algunos paleontólogos de la conferencia como Danilo Torre y Augusto Azzaroli. Las discrepancias entre la micro y macrofauna podrían resolverse con un estudio paleomagnético detallado de Barranco León 5.

Mientras se espera la datación definitiva de Barranco León 5, los últimos hallazgos de Orce, junto con los del yacimiento TD6 de la Gran Dolina (Atapuerca) y, por supuesto, la mandíbula de Dmanisi indican una muy temprana presencia de *Homo* en Europa. Sin embargo, Wil Roebroeks y Thijs van Kolfschoten alertaron acerca de la necesidad de comparar los restos anteriores a 500.000 años (que son escasos, fragmentarios y muy discutidos) con los de menos de esa edad (abundantes, más completos y aceptados de forma general). La intervención de Roebroeks fue una de las pocas que dudaron de la ocupación temprana de Europa por parte de *Homo*, una duda que incluye, por supuesto, los hallazgos

de Orce. La ausencia, debida a problemas familiares de última hora, de Yves Coppens Ñun ardiente defensor de la aparición fuera de Africa de *Homo erectus* como especie limitó el alcance del debate. Sus tesis aparecieron en el transcurso de las mesas redondas de la conferencia, pero de forma muy breve.

Si se admite la presencia temprana de *Homo* ya sea en el este u oeste de Europa (o en ambos extremos), nos encontramos con un problema: la falta de restos de homínidos en el tramo temporal que se extiende entre 0,8 y 0,5 millones de años. ¿Todavía no se han encontrado esos yacimientos o, simplemente, no existen? En la conferencia de Orce, Wolpoff sostuvo que el primer intento de los homínidos de ocupar Europa acabó en un fracaso, y propuso, en consecuencia, distinguir entre "ocupación" y "ocupación efectiva" de Europa. Sea como sea, y a guisa de conclusión final, tanto Atapuerca como Orce se han convertido en puntos de referencia obligada a la hora de discutir la salida de Africa de *Homo*. Tan obligada, que la sorprendente similitud de los paisajes de Orce con los de la garganta de Olduvai (Tanzania) y la posible presencia en la península Ibérica de homínidos tan alejados en el tiempo llevaron a Clark Howell a proponer una irónica solución al enigma... ¡Quizá Africa comienza en los Pirineos!

CAMILO JOSÉ CELA CONDE
Universidad de las Islas Baleares

Enanas marrones

Teide 1

Durante décadas se ha especulado sobre la existencia de enanas marrones, cuerpos celestes que podrían constituir un eslabón entre las estrellas de menor masa y los planetas gigantes, como Júpiter, cuya masa es aproximadamente una milésima de la que posee el Sol. No hay razón para pensar que tales objetos subestelares no puedan formarse libremente en el espacio siguiendo un proceso similar al del nacimiento de las estrellas: resultado, pues, del colapso gravitatorio y fragmentación de nubes de polvo y gas. Sin embargo, a pesar de las muchas búsquedas realizadas, no ha podido demostrarse todavía su existencia.

Una enana marrón es un objeto gaseoso autogravitante, compuesto principalmente de hidrógeno y helio, que tiene una masa insuficiente para que en su interior se produzca de forma estable la fusión de hidrógeno. Se espera que su tamaño sea similar al de Júpiter, aunque la densidad y gravedad en la superficie deben ser mayores. Se acepta que la masa límite que separa estrellas de enanas marrones se halla en torno al 7 u 8 % de la masa del Sol. Sin capacidad para generar energía nuclear, la contracción gravitatoria de una enana marrón procede inevitablemente hasta que la presión de los electrones degenerados en su interior detiene el colapso. La luminosidad y temperatura de estos objetos decrecen progresivamente a lo largo de su vida resultando muy difícil su detección cuando la edad es superior a varios cientos de millones de años.

El cercano cúmulo estelar de las Pléyades, una agregación de estrellas que nació hace unos cien millones de años y dista del Sol unos 400 años luz, constituye uno de los contextos astronómicos más adecuados para intentar la detección y posterior estudio de las enanas marrones. Con tan corta edad, éstas deberían hallarse en pleno proceso de contracción gravitatoria, radiando mucha más energía que en fases posteriores de su evolución. Las enanas marrones de mayor masa de las Pléyades deberían ser detectables en exploraciones de suficiente profundidad que, gracias a los actuales detectores CCD, son factibles incluso con telescopios de moderado tamaño.

En 1993 iniciamos en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) un programa de exploración sistemática del cúmulo de las Pléyades, en el que participan María Rosa Zapatero Osorio y Eduardo Martín. Utilizando el telescopio IAC80, que acababa de instalarse en el Observatorio del Teide, pretendíamos explorar una región de un grado cuadrado de cielo, lo que cubriría aproximadamente el 6 % del área total subtendida por el cúmulo. La técnica a emplear consistía en obtener imágenes directas capaces de detectar objetos muy débiles en el infrarrojo cercano, buscando su contrapartida en la banda más roja del espectro óptico.

Según los cálculos realizados por investigadores de las universidades de Roma y Arizona y del Instituto de Tecnología de Massachusetts, las enanas marrones con una masa alrededor del 6 % de la masa solar serían detectables en nuestra búsqueda.

Cuando sólo habíamos explorado el 0,3 % del área del cúmulo, se consiguió la detección de un tenue objeto cuyo color extraordinariamente rojo indicaba posiblemente una temperatura superficial muy baja. En primer lugar, confirmamos que su movimiento en el espacio coincide con el de las estrellas del cúmulo y, más tarde, se realizó la caracterización fotométrica precisa con el telescopio nórdico de 2,5 m en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma). El 29 de diciembre de 1994 obtuvimos con el telescopio de 4,2 m en La Palma varios espectros de buena resolución entre 600 y 900 nanómetros que confirmaban el descubrimiento de uno de los objetos de apariencia estelar más fríos que se conocen en el cielo. Las líneas espectrales de potasio neutro entre 767-770 nanómetros indicaban que se trataba de un objeto de alta gravedad superficial, como cabía esperar de una enana marrón; la presencia de bandas prominentes de óxido de titanio y, especialmente, de óxido de vanadio a 750 nanómetros permitía su clasificación espectral y la estimación de su temperatura superficial: unos 2350 kelvins. Aunque dadas las incertidum-



Comparación a escala de los tamaños del Sol, la enana marrón Teide 1 descubierta en el cúmulo de las Pléyades, el planeta Júpiter y la Tierra. La enana marrón se encuentra en proceso de contracción gravitatoria. De aquí a unos cientos de millones de años, su diámetro será muy similar al de Júpiter; la masa de la enana es varias decenas de veces mayor que la del planeta y su gravedad superficial, por tanto, muy superior. Actualmente, la temperatura superficial efectiva de Teide 1 se estima en unos 2100 grados centígrados. Cabe esperar que, al terminar su contracción, esta temperatura se haya reducido en varios cientos de grados

bres asociadas a estas medidas no podemos descartar una temperatura unos cientos de grados más alta.

El espectro permitió medir la velocidad de este objeto respecto al Sol, que resultó muy parecida a la de las estrellas del cúmulo. Todas nuestras observaciones sugieren que nuestro objeto es un miembro del cúmulo y que, por tanto, su edad es la de éste, unos 100 millones de años con un margen de error inferior al 30 %. Es la primera vez que se puede determinar la edad de un cuerpo celeste de estas características con semejante precisión, superándose una de las limitaciones más importantes para discernir la auténtica naturaleza subestelar de las candidatas a enanas marrones. A partir de la distancia del cúmulo pudimos determinar que la luminosidad de Teide 1, así decidimos llamarle, es una milésima de la luminosidad del Sol.

La comparación de sus características fundamentales (luminosidad, temperatura y edad) con todos los modelos evolutivos existentes en la literatura científica nos llevó a la conclusión de que Teide 1 debía ser una enana marrón. Las incertidumbres en sus parámetros básicos eran suficientemente pequeñas como para poder clasificarle sin ambigüedades, siempre dentro de las limitaciones de nuestro conocimiento actual. Su masa se estimó entre 10 y 70 veces la masa de Júpiter, aunque más probablemente esté cerca de la cota superior. Una determinación más precisa requiere de observaciones adicionales, por ejemplo, la medida de la concentración de litio en su atmósfera puede indicarnos la masa con gran precisión.

El test del litio para enanas marrones que propusimos hace varios años en una serie de trabajos conjuntos con Antonio Magazzú y Eduardo Martín se reconoce ahora como uno de los mejores métodos para establecer la naturaleza subestelar de una enana marrón, es decir, para discernir si un objeto es capaz de producir fusión de hidrógeno en su interior. Cuando en los centros de las estrellas se alcanzan temperaturas de unos tres millones de grados, pueden desencadenarse reacciones nucleares que “queman” el hidrógeno y, entonces, concurren necesariamente las circunstancias para que reacciones entre los núcleos de hidrógeno y los de litio ocasionen la destrucción de este último. A diferencia de las estrellas, que en sus interiores siempre tienen “hornos nucleares” y por tanto destruyen su litio, las enanas marrones pueden preservarlo, y la detección de litio en un candidato a enana marrón es signo inequívoco de que el objeto posee naturaleza subestelar.

Nuestros cálculos, y también los de otros grupos, indican que en el cúmulo de las Pléyades la frontera entre estrellas muy débiles y enanas marrones puede delimitarse por la ausencia o presencia de litio. Tras varias e infructuosas búsquedas de litio en los objetos más débiles de este cúmulo, que nosotros realizamos principalmente con el telescopio de 4,2 metros en la Palma y astrofísicos de la Universidad de Berkeley con el telescopio Keck de 10 metros (el mayor telescopio óptico del mundo) en Hawai, estos últimos anunciaron, hace tan sólo unos meses, el descubrimiento de litio en uno de los objetos más débiles de las Pléyades, PPl 15; llegaron a la conclusión de que, por fin, se había descubierto un objeto en la frontera entre estrellas y enanas marrones. En consecuencia, cualquier objeto del cúmulo de las Pléyades que fuera más frío y menos luminoso que PPl 15 debería ser una enana marrón.

Teide 1 es unas dos veces más débil y posee menor temperatura superficial que PPl 15, por lo que todo apunta a que se trata de una genuina enana marrón. Confiamos poder lograr la detección de litio en su atmósfera, un difícil reto observacional, incluso para el telescopio Keck, que puede confirmar a Teide 1 como el primer cuerpo celeste legítimamente identificado como enana marrón. El descubrimiento de Teide 1 en la exploración de una pequeña fracción del área del cúmulo parece indicar que se trata de un tipo de objeto bastante numeroso; en las Pléyades podría haber centenares de ellos.

Además, dado que hay razones para pensar que la formación estelar en el disco de nuestra galaxia pudo haber procedido como en los cúmulos estelares y que éstos son los lugares habituales de nacimiento de estrellas, el número de enanas marrones en el disco de la galaxia puede ser muy alto y configurar una de las clases de objetos más numerosas. Al ser tan poco masivos, resulta difícil que puedan aportar una contribución significativa al problema de la materia oscura en nuestra galaxia, es decir, a la aparente diferencia entre la estimación de su contenido material por métodos dinámicos y el establecido por métodos de conteo óptico. Los recientes resultados sobre enanas marrones sugieren un futuro muy brillante para unos objetos tan poco luminosos.

Rafael Rebolo López
Instituto de Astrofísica de Canarias

Fiebre aftosa

Estructuras antigénicas

La técnica del ADN recombinante encuentra en la industria farmacéutica uno de sus campos naturales de aplicación. La síntesis de hormonas, enzimas o antígenos y otras proteínas recombinantes por organismos genéticamente modificados permite su producción masiva y con un coste económico inferior al que implica obtenerlas a partir de sus fuentes naturales. El interés de esta estrategia radica no sólo en que las proteínas recombinantes pueden reproducir las propiedades biológicas de sus homólogos naturales, sino también en que admiten la modificación o mejora de las mismas por mutagénesis dirigida.

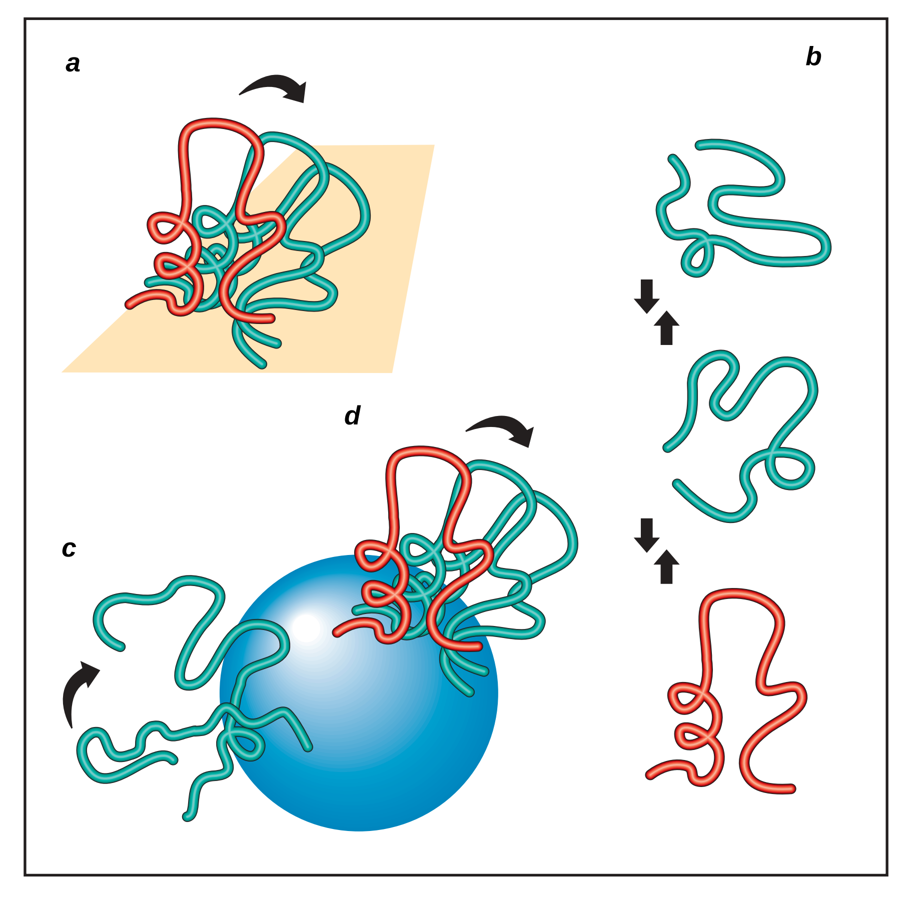
Existen otras razones, además de las económicas, que aconsejan desarrollar proteínas recombinantes para suplir a los productos naturales. Un ejemplo de ello son las vacunas que utilizamos para prevenir las enfermedades infecciosas de naturaleza vírica. Las vacunas clásicas que se administran desde hace décadas y que han permitido erradicar la viruela y controlar la poliomielitis, se componen de partículas víricas de una cepa atenuada, es decir, una estirpe vírica infecciosa e incapaz de causar la enfermedad contra la que se vacuna. Las propiedades inmunogénicas de estas partículas víricas son las mismas que las de la cepa salvaje, y así protegen contra la misma. Un segundo tipo de vacunas contienen virus de la cepa virulenta después de su inactivación por tratamientos químicos. En ambos casos, la producción industrial de los componentes vacunales exige la manipulación de grandes cantidades de material infeccioso vírico, lo que comporta ciertos riesgos biológicos.

El desarrollo de vacunas de nueva generación, en las que el elemento inductor de la respuesta inmunitaria sea una o varias proteínas víricas recombinantes, es uno de los retos de la investigación biomédica. En este sentido, se está utilizando ya una vacuna recombinante contra la hepatitis B.

Por desgracia, no siempre las proteínas recombinantes logran reproducir completamente las propiedades antigénicas e inmunogénicas de sus equivalentes naturales. Un ejemplo que ilustra esta dificultad de mímesis lo encontramos en la historia científica del virus de la fiebre aftosa, que pertenece, como los virus responsables de la poliomielitis o del resfriado común, a la familia *Picornaviridae*.

La fiebre aftosa o glosopeda es una de las enfermedades animales más importantes por las pérdidas económicas que ocasiona. Existen siete serotipos del virus que no manifiestan reactividad cruzada, amén de una multitud de subtipos en cada uno de ellos. A lo largo de los últimos 15 años, han ido fracasando uno tras otro los intentos de desarrollar una vacuna recombinante basada en péptidos sintéticos o en proteínas recombinantes; no se conseguía reproducir con eficacia las características antigénicas e inmunogénicas de las proteínas víricas.

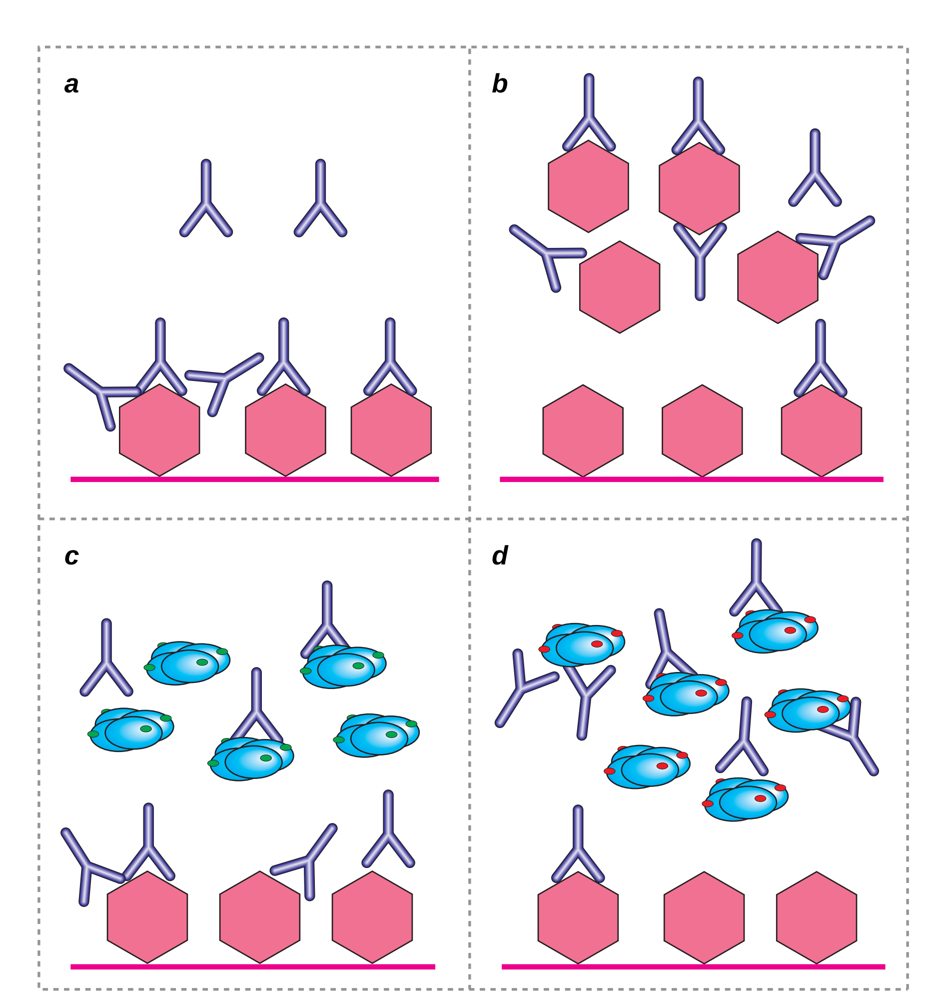
Una de las regiones inmunodominantes contra las que el organismo dirige anticuerpos neutralizantes durante la respuesta inmunitaria, y en gran manera responsable de la diversidad antigénica del virus, es el sitio antigénico A. Se halla contenido éste en un péptido hipervariable de unos 20 aminoácidos dentro de la proteína estructural VP1. La variabilidad de secuencia en dicha región se traduce en cambios del perfil antigénico del virus. El péptido en cuestión se encuentra expuesto en la superficie del virus y forma un bucle invisible por difracción de rayos X. Esto indica una gran flexibilidad del mismo, presumiblemente causada por oscilación alrededor de un eje imaginario que cruza su base, lo que podría generar un abanico limitado de posiciones o conformaciones.



1. El bucle de la proteína VP1 que contiene el sitio antigénico A se encuentra expuesto al solvente en la superficie de la cápside vírica. Puede adoptar diversas conformaciones, de las cuales algunas (en rojo) *son predominantes* (a). *Un péptido en solución con la misma secuencia de aminoácidos puede mostrar otra serie distinta de conformaciones* (b), *al igual que un péptido fusionado al extremo amino terminal de una proteína recombinante* (c). *Si el péptido se encuentra insertado en un entorno molecular apropiado de la proteína transportadora, podría mimetizar su movilidad y patrón conformacional natural* (d)

Durante la respuesta inmunitaria, cada anticuerpo neutralizante dirigido contra el sitio A del virus reconocería preferentemente el péptido en alguna de dichas conformaciones. Aunque en virus de serotipo C los epítopos contenidos en esta zona son continuos, la reactividad de péptidos sintéticos en solución con anticuerpos dirigidos contra el sitio A es peor que la del virus intacto. Ello da a entender que el péptido no reproduce bien el espectro conformacional natural del sitio A. Esta explicación sería también aplicable a la baja reactividad con suero antivirus de algunas proteínas VP1 recombinantes.

En nuestro laboratorio de la Universidad Autónoma de Barcelona abordamos una nueva estrategia con la que reproducir las propiedades antigénicas del sitio A en proteínas recombinantes. Para ello, insertamos un segmento de ADN que codifica el péptido antigénico en diferentes regiones del gen *lacZ* de *Escherichia coli*. Los diferentes genes *lacZ* recombinantes así generados expresaban proteínas β-galactosidasa quiméricas en las que la región vírica representaba en entornos moleculares distintos, de acuerdo con el sitio de inserción.



2. En un ELISA en el que el antígeno inmovilizado es el virus nativo, la reactividad de anticuerpos monoclonales antisitio A (a) *se inhibe en presencia de partículas víricas en solución que compiten por los anticuerpos* (b). *Este descenso de reactividad es menor con un competidor que no reproduzca las características del sitio antigénico* (c) *o comparable con la del virus si la mímesis del sitio antigénico es correcta* (d)

Confiábamos en que alguno de estos sitios ejerciera las mismas constricciones estructurales que las que recibe el péptido en la superficie de virus, y, por tanto, permitiese mimetizar su movilidad y su comportamiento antigénico consiguiente en la superficie de la enzima.

En colaboración con M. G. Mateu, del Centro de Biología Molecular de Madrid, estudiamos la antigenicidad de nuestra colección de proteínas en ELISA de competición, en el que cada una de ellas competía, con virus inmovilizado, por anticuerpos monoclonales neutralizantes antivirus que reconocen distintos epítopos en el sitio A. En ausencia de competidor, los anticuerpos reaccionaban con el antígeno de la placa dando lugar a una señal intensa en el ELISA. Cuando competía el propio virus, la señal se reducía sensiblemente, ya que los anticuerpos eran "secuestrados" por las partículas en solución.

A la misma concentración que el virus, la mayoría de nuestras proteínas no eran capaces de reducir la señal tanto como el virus, indicando una vez más que el sitio A recombinante, aunque expuesto al solvente, no se presentaba a los anticuerpos en su forma natural. Sin embargo, dos de las proteínas ensayadas competían muy eficazmente, igual que el virus. En ambas, los lugares de inserción son muy próximos y dentro de un bucle expuesto de la enzima que se extiende desde cada subunidad de β-galactosidasa a la siguiente y que participa en el sitio activo. La mímesis de la estructura antigénica del sitio A en las mismas sugiere que el entorno molecular que encuentra el péptido vírico recombinante le permite adoptar ahí su espectro conformacional natural y llevar a cabo la correcta interacción con los anticuerpos necesaria para una buena reactividad.

La reproducción de este sitio antigénico complejo por inserción selectiva en la superficie de una proteína transportadora como la β-galactosidasa supone un paso importante en el diseño de antígenos recombinantes con fines diagnósticos. Sin embargo, nuestras proteínas, a pesar de ser buenos antígenos, no son buenos inmunógenos, lo que indica que la mímesis del perfil antigénico es una condición quizá necesaria, pero no suficiente, para inducir una respuesta inmunitaria eficaz. Es de esperar que nuevos progresos en biotecnología y microbiología aplicada, junto con el constante acúmulo de información sobre la estructura de proteínas y la respuesta inmunitaria, permita, en un futuro no muy lejano, que el diseño de vacunas deje de abordarse únicamente a través de ensayo y error.

ANTONIO VILLAVERDE
Universidad Autónoma de Barcelona

Mundo celtibérico

Numancia

Numancia encabezó la resistencia de los celtíberos contra Roma durante más de veinte años. Las así llamadas guerras celtibéricas transcurrieron entre el 153 y 151 y entre el 143 y 133 antes de Cristo. Para poner fin a esta situación, Roma tuvo que enviar al más afamado de sus generales, Publio Cornelio Escipión. Vencedor éste de Cartago aisló la ciudad soriana por medio de un cuidado cerco, constituido por 7 campamentos y un sólido muro de 9 kilómetros de perímetro, condenándola, después de 15 meses de asedio, a morir por inanición en el año 133 a.C. Su resistencia y heroica caída impresionó tanto a sus vencedores, que Numancia se convirtió en el emblema de la lucha de un pueblo por su libertad.

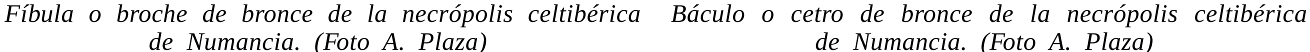
Las excavaciones arqueológicas, realizadas en los inicios de este siglo, pusieron al descubierto una amplia superficie de la ciudad, pero no pudieron localizar la necrópolis, a pesar del extenso programa de sondeos en torno a Numancia. Los escritores de la Antigüedad describen un doble ritual de enterramiento entre los celtíberos. Según Silo Italico "dan sepultura en el fuego a los que mueren de enfermedad..., más a los que pierden la vida en la guerra... los arrojan a los



Fíbula o broche de bronce de la necrópolis celtibérica de Numancia. (Foto A. Plaza)



Báculo o cetro de bronce de la necrópolis celtibérica de Numancia. (Foto A. Plaza)



buitres, que estiman como animales sagrados". La ausencia de la necrópolis de incineración llevó a centrar la atención, sin bases suficientes, en unos círculos de piedra situados en la ladera sur de Numancia, como el lugar idóneo para la práctica de este segundo ritual, que aparecía reflejado en algunas escenas de guerreros muertos picoteados por rapaces, representadas en las cerámicas numantinas.

Hasta que, en 1993, se descubrió en la ladera sur del cerro de Numancia la necrópolis celtibérica. Su excavación está aportando una importante información sobre la vida de los numantinos. A través del estudio de la estructura de las tumbas, los elementos de ajuar, la composición y organización del cementerio, así como de los análisis osteológicos, podemos conocer relaciones grupales y familiares, y determinar la organización socioeconómica.

La necrópolis ha proporcionado, hasta ahora, 140 tumbas. El cuerpo del difunto era incinerado con sus vestidos y adornos personales en una pira; cenizas y restos de huesos quemados se depositaban directamente en un hoyo realizado en el suelo. Las tumbas descubiertas ofrecen una estructura funeraria muy simple. Consiste básicamente en un pequeño hoyo de dimensiones variables, limitado y protegido de forma parcial por algunas piedras, que a veces llegan a formar auténticas cajas; los restos de cremación van acompañados de ajuares y ofrendas de distinta naturaleza —predominando los adornos de bronce y las armas de hierro— y de un pequeño vaso cerámico, posiblemente de ofrendas. Algunos enterramientos están señalizados con estelas o piedras hincadas, visibles al exterior.

Las armas y objetos de metal aparecen, al igual que en otras necrópolis celtibéricas, doblados e inutilizados intencionadamente. Esta práctica trataba de evitar la separación del difunto de sus objetos personales, ya que existía una completa identificación entre la persona y sus objetos (las armas para el guerrero) como exponentes visibles de su propia identidad; también existen referencias etnográficas de la necesidad de la muerte ritual, la destrucción íntegra del objeto o el arma, para que su espíritu pueda acompañar al difunto al Más Allá.

Las 140 tumbas se concentran en dos grandes grupos, dejando espacios intermedios con menor intensidad o sin enterramientos. Estos grupos se diferencian por su ubicación espacial y por las características de sus ajuares: uno, situado en la zona más alta de la ladera, contiene elementos de adorno y objetos de prestigio de bronce (báculos de distinción); otro se sitúa en una posición más baja y está caracterizado por la presencia de armas y objetos de hierro. Esta diferenciación estaría en función del esquema de organización social de la ciudad.

Los análisis realizados sobre los restos óseos de 23 tumbas han proporcionado importantes datos para el conocimiento de aspectos relacionados con el ritual, así como con la dieta alimenticia, de la que se derivan implicaciones sociales, económicas y ambientales.

Todos los huesos humanos han sido cremados a una temperatura que oscila entre 600 y 800 grados C., lo que se ha podido determinar por su coloración y contenido orgánico. Los huesos humanos corresponden únicamente a zonas craneales y huesos largos, lo que indica una selección de los huesos que se introducen en las tumbas. Es frecuente que acompañen a los restos humanos huesos de fauna, a veces cremados, correspondientes a zonas apendiculares, costillares y mandíbulas, que se relacionan con porciones de carne del banquete funerario destinadas al difunto. Un porcentaje alto de tumbas (31,8 %) únicamente contienen restos de fauna, lo que hace pensar en enterramientos simbólicos, condicionados por la dificultad de recuperar el cuerpo del difunto.

Un aspecto destacado de la analítica es la determinación de la dieta alimenticia a través del análisis de oligoelementos contenidos en los restos óseos humanos. La dieta de los numantinos era rica en componentes vegetales, con un peso importante de los frutos secos (nueces y bellotas) y pobre en proteínas animales, lo que dibuja claramente las bases de su economía mixta. Pero además, el conocimiento de la dieta de cada individuo permite relacionar su mayor o menor riqueza con las características de su ajuar y estatuto social, así como establecer las diferencias entre hombre y mujer.

Estos análisis, junto a otros que se están realizando para conocer el ADN y el entorno ambiental de Numancia, permitirán en un futuro próximo dibujar un panorama más rico y preciso de la vida de los numantinos.

A. Jimeno
Departamento de Prehistoria.
Universidad Complutense

G. Trancho
Departamento de Antropología.
Universidad Complutense

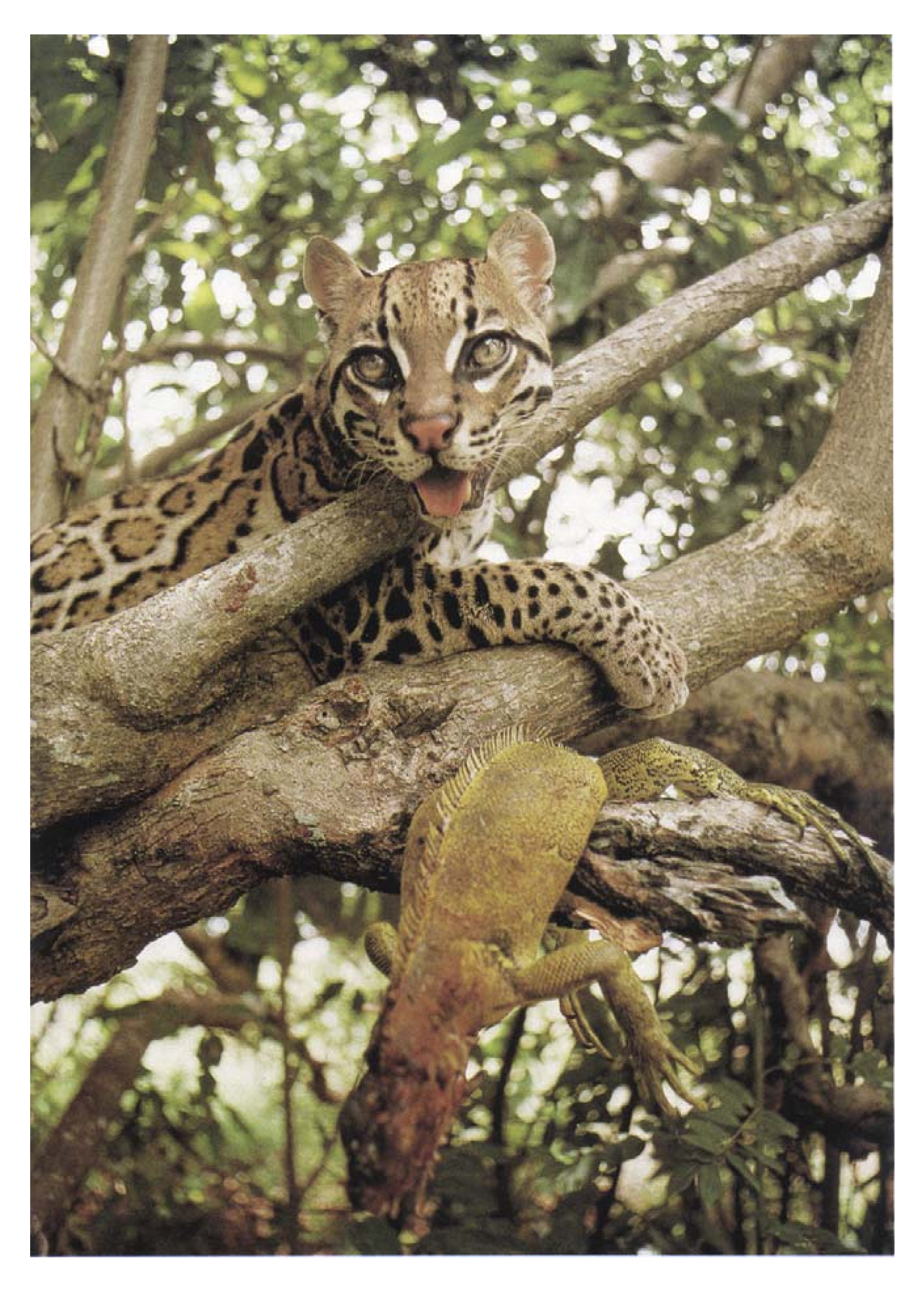
Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

Mirada de ocelote

El ocelote es un carnívoro de tamaño pequeño que habita en ambos hemisferios americanos, desde el sur de Texas hasta el norte de Argentina. Activo por la noche, no desperdicia el día si conviene. Suele vivir en soledad. Aunque lo suyo es el suelo, trepa también a los árboles y nada con soltura. Se encuentra desde el nivel del mar hasta los 1000 metros de altitud, en ambientes muy dispares: selvas húmedas, sabanas, bosques de ribera y lugares abiertos y áridos. Caza roedores, monos y otros mamíferos de talla pequeña, pero no le hace ascos a los pájaros, serpientes, iguanas y peces. Si el labriego se descuida, puede perder también algún lechón, oveja y ave de corral. Su piel ha sido siempre muy apreciada por la industria peletera. Por esa razón ha sufrido una caza implacable e indiscriminada que ha mermado notablemente su población. Hoy está protegido por la ley.

Nos encontrábamos en los llanos venezolanos de Apure. En los alrededores de la hacienda donde nos acomodábamos, vivía un ocelote acostumbrado a la presencia humana. Fuimos a fotografiarlo en un bosque llanero por el que tenía mucha querencia. Tras corretear por el suelo, le vimos trepar raudo a los árboles. Un ruido característico de animal entre hojas había llamado su atención. Se trataba de una iguana (*Iguana iguana*), reptil muy común en la zona. La vegetación estaba tan enmarañada, que no pudimos ver la caza, sólo oírla. Tranquilamente, con la iguana en la boca, el ocelote bajó hasta un reposadero del árbol, cerca del suelo donde permaneció jadeante. Fue el momento que aprovechamos para fotografiarlo con un teleobjetivo corto.





Memorias holográficas

Al cabo de más de treinta años, los investigadores están a punto de utilizar hologramas para almacenar datos en unas memorias que conjugan rapidez y vasta capacidad

Demetri Psaltis y Fai Mok

A lo largo de los 15 últimos años, el almacenamiento de datos por medios ópticos ha constituido uno de los puntos brillantes de la técnica. Los discos compactos, por ejemplo, dominan el mercado de las grabaciones musicales, amén de ser el soporte típico de las publicaciones multimedios, que combinan textos, imágenes y sonidos. Entre los productos multimedios disponibles en disco compacto para ordenadores personales se cuentan videojuegos, revistas profesionales, enciclopedias y mapas.

No cabe duda de que las memorias ópticas almacenan cómodamente y a bajo precio cantidades ingentes de información digitizada. Un solo disco compacto puede dar cabida a unos 640 millones de octetos, suficientes para registrar una hora y cuarto de música de alta fidelidad o para más de 300.000 páginas de texto mecanografiado a doble espacio. Pese a ello, todo parece indicar que estas grandes memorias han estimulado la demanda de soportes aún más económicos y de mayor capacidad. Los directivos de la industria de espectáculos querrían poder registrar una o más películas de cine en un solo disco óptico del tamaño de un CD, y tan grande es la necesidad de almacenar datos en ciertos hospitales y asesorías jurídicas, en organismos gubernamentales y bibliotecas, que ha sido preciso recurrir a sistemas multidisco.

La respuesta de los ingenieros ha consistido en esforzarse por sacar el máximo partido de los sistemas de discos compactos. Unos trabajan en láseres de semiconductores de menor longitud de onda (que, a modo de agujas de grabación más finas, permitirían apretujar más los bits en el disco). Otros están investigando técnicas de compresión de datos y de "superresolución", las cuales permitirían también densidades más elevadas (a costa, en el último caso, de aumentar el ruido de fondo). Otro desarrollo prometedor han sido los discos de múltiples niveles, en los que se encuentran apiladas dos o más pistas de datos, que lee un sistema óptico capaz de enfocar un nivel por vez. Se espera que tales métodos lleven la capacidad de los discos compactos hasta las decenas de millar de megaoctetos en el plazo aproximado de unos cinco años.

Mas para empaquetar un disco del tamaño de un compacto con muchísimos más datos —cientos de miles de megaoctetos, pongamos por caso— será necesario un método fundamentalmente distinto: el holográfico. La

DEMETRI PSALTIS y FAI MOK empezaron su colaboración en el Instituto de Tecnología de California. Psaltis es profesor de ingeniería eléctrica y responsable de computación y sistemas neuronales en el Caltech. En sus investigaciones se interesa, sobre todo, por campos que combinen la óptica y las ciencias informáticas. Psaltis ha realizado amplios estudios sobre computadoras ópticas y ha llevado a cabo trabajos pioneros que establecieron la analogía entre la holografía y las redes neuronales adaptativas. En 1989 le fue concedido el Premio de la Comisión Internacional de Optica. Mok es presidente de Holoplex, compañía que fundó con Psaltis en 1993. Ha estado concentrándose en el almacenamiento y procesamiento volumétrico de información holográfica desde 1988.



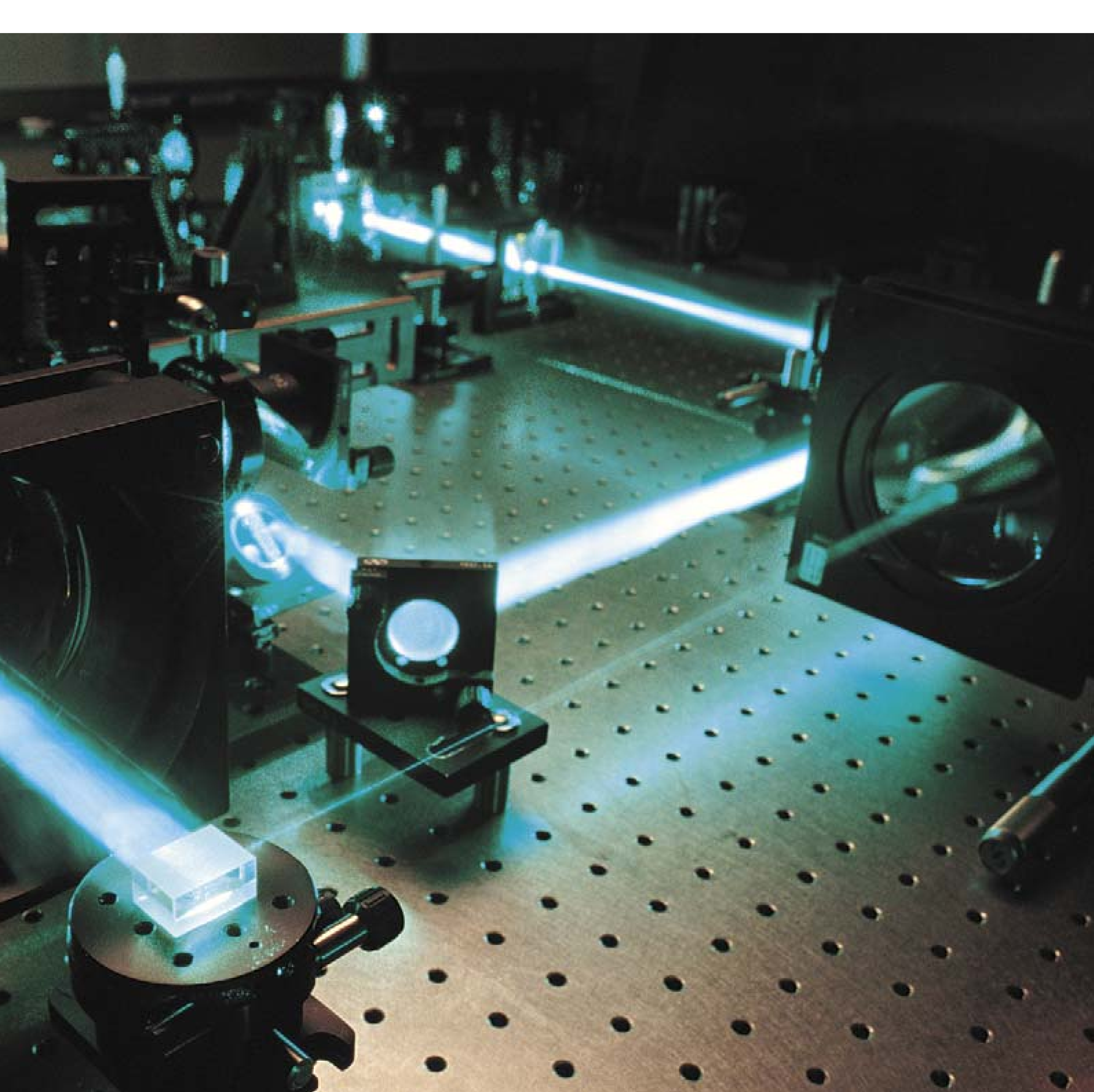
1. UNA MEMORIA HOLOGRAFICA almacena datos en un cristal de niobato de litio no mucho mayor que un terrón de azúcar (*primer plano*). El holograma se crea en el seno del cristal por interferencia de un haz de láser de referencia, que en esta fotografía se representa grueso y brillante, con un haz de señal, fino y más débil, que contiene los datos.

idea se remonta a 1963, cuando Pieter J. van Heerden, de Polaroid, propuso ese método con el fin de almacenar datos en tres dimensiones.

Capacidad de las memorias holográficas

Según se cree en la actualidad, es concebible que las memorias holográficas puedan almacenar cientos de miles de megaoctetos, que alcancen velocidades de transferencia de mil megabits por segundo o superiores y que logren seleccionar un elemento de datos elegido al azar en menos de 100 microsegundos. Ninguna otra técnica de memorias capaz de ofrecer simultáneamente estas tres ventajas se encuentra tan próxima como ésta a la comercialización. De ahí el empeño de Rockwell, IBM y GTE en lanzar o reforzar el desarrollo de memorias holográficas.

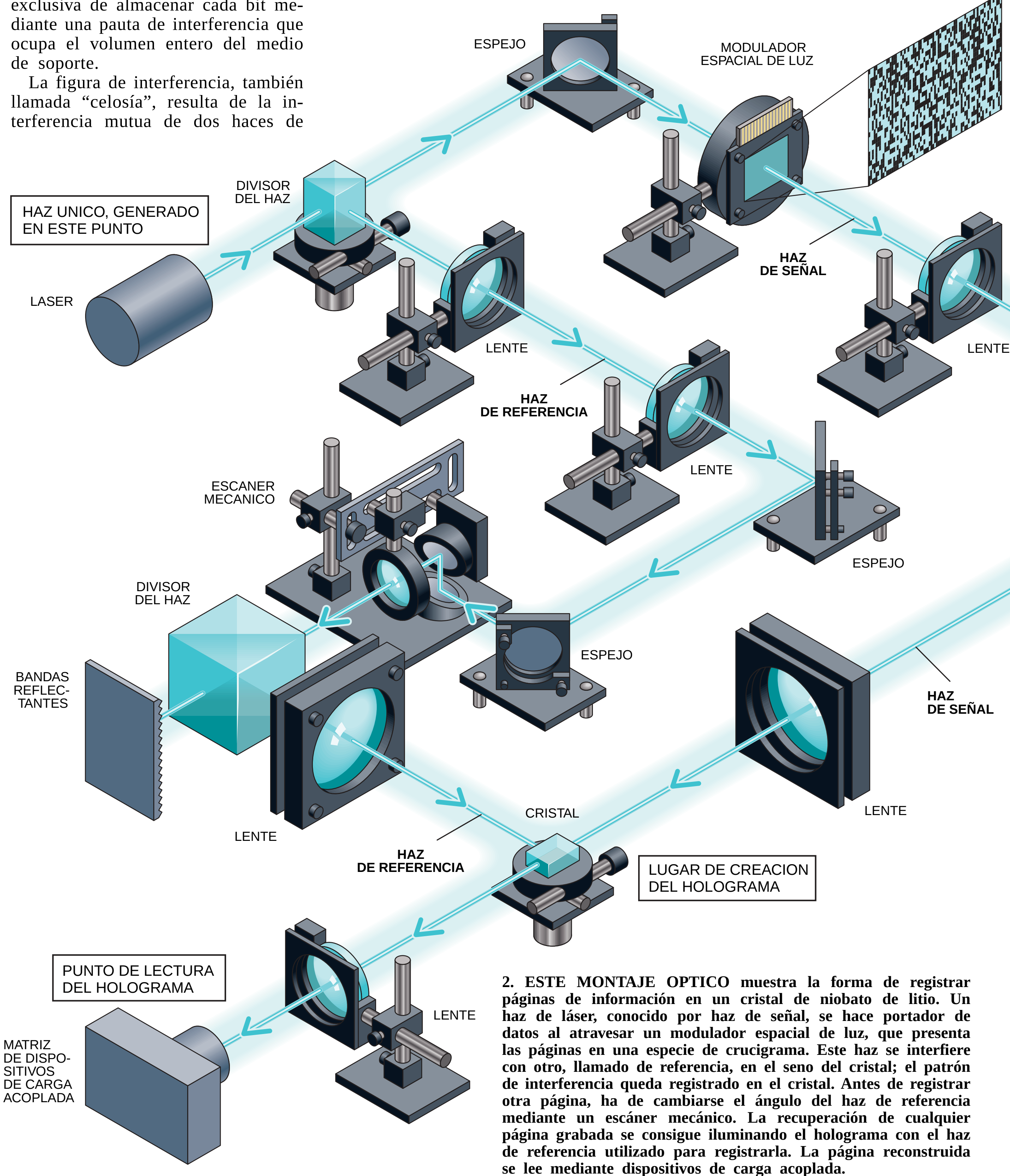
Es probable que, al principio, el costo y la novedad de la técnica la confinen a un puñado de aplicaciones especiales que exijan capacidades y velocidades extraordinarias. Tales aplicaciones están empezando ya a excavar para sí pequeños nichos: un producto reciente almacena holográficamente las huellas dactilares del personal autorizado a entrar en áreas restringidas, permitiendo el acceso cuando se apoya un dedo registrado sobre una lámina de vidrio. Si la satisfacción de tales necesidades hiciese madurar la técnica, tornándola menos onerosa, ésta podría superar al disco óptico como medio de almacenamiento digital de alta capacidad en la informática de aplicaciones generales.



Las principales ventajas del almacenamiento holográfico —gran densidad y velocidad elevada— son resultado de la grabación tridimensional y de la lectura completa de toda una página de datos de una sola vez. Las memorias holográficas tienen la peculiaridad exclusiva de almacenar cada bit mediante una pauta de interferencia que ocupa el volumen entero del medio de soporte.

La figura de interferencia, también llamada "celosía", resulta de la interferencia mutua de dos haces de láser en el seno de un material fotosensible, cuyas propiedades ópticas quedan modificadas por la acción de los haces interfirientes.

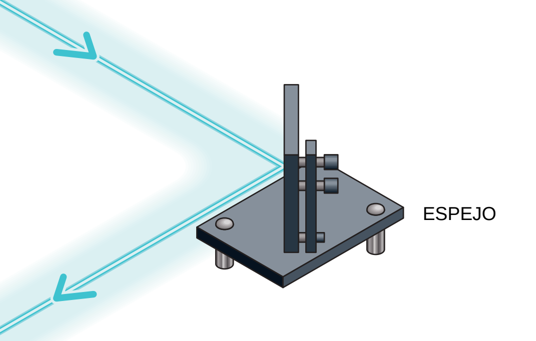
Antes de que los bits de datos puedan quedar así inscritos en el cristal, han de representarse mediante una matriz de cuadrados, transparentes y opacos, en una pantalla de cristal líquido (LCD), algo así como una versión en miniatura de las pantallas de los ordenadores portátiles. A través



2. ESTE MONTAJE OPTICO muestra la forma de registrar páginas de información en un cristal de niobato de litio. Un haz de láser, conocido por haz de señal, se hace portador de datos al atravesar un modulador espacial de luz, que presenta las páginas en una especie de crucigrama. Este haz se interfiere con otro, llamado de referencia, en el seno del cristal; el patrón de interferencia queda registrado en el cristal. Antes de registrar otra página, ha de cambiarse el ángulo del haz de referencia mediante un escáner mecánico. La recuperación de cualquier página grabada se consigue iluminando el holograma con el haz de referencia utilizado para registrarla. La página reconstruida se lee mediante dispositivos de carga acoplada.

de esta matriz, llamada “página”, similar a un crucigrama, se hace pasar un haz de láser verde-azul, que, una vez enfocado por un sistema de lentes, constituye el haz de señal. Cuando el haz de señal se encuentra en el seno del cristal fotosensible con otro haz, llamado de referencia, se forma un holograma de la página de datos. El haz de referencia, en este caso, se colima, lo que significa que todas las ondas luminosas que lo componen están sincronizadas, y que, al atravesar un plano, sus crestas y senos lo hacen “marcando el paso” (por lo que tales ondas se denominan ondas planas). La celosía que se forma en la interferencia de los haces de señal y de referencia crea en el seno del cristal una configuración de refractividad variable.

Así registrada, la página se reconstruye holográficamente volviendo a iluminar el cristal con el haz de referencia bajo el mismo ángulo con que penetró en el material para crear el holograma. Al ir pasando a través de la celosía del cristal, el haz de referencia se va difractando de forma tal que reproduce la imagen de la página original y la información contenida en ella. A continuación, se proyecta la página reconstruida sobre una matriz de detectores electroópticos que perciben la configuración de puntos brillantes y oscuros, leyendo así de una vez toda la información contenida en la página. Los datos pueden después almacenarse electrónicamente para facilitar su acceso o manipulación desde cualquier ordenador.



La característica clave estriba en la precisión con la que el haz de referencia para la “reproducción” ha de igualar al haz original utilizado para grabar la página. Tal precisión depende del espesor del cristal: cuanto más grueso el cristal, tanto mayor la exactitud con que ha de ordenarse el haz de referencia. Si el cristal tiene un espesor de un centímetro y el ángulo de iluminación se desvía una milésima de grado, la reconstrucción desaparece. Lejos de constituir un inconveniente, en casi todas las memorias holográficas se saca partido de este mecanismo básico. Se registra holográficamente en el cristal la primera página de datos. A continuación se incrementa el ángulo del haz de referencia hasta que desaparece la reconstrucción del primer holograma. Se introduce, entonces, una segunda página de datos y se la graba holográficamente. Este procedimiento de multiplexación angular se repite muchas veces. Podemos observar cualquier holograma registrado si iluminamos el cristal con el haz de referencia, ajustado en el ángulo adecuado.

¿Cuántas páginas podemos inscribir en un solo cristal? Depende del rango dinámico del material que lo forma: conforme aumenta el número de hologramas que comparten el mismo volumen cristalino, disminuye la intensidad de cada uno. Específicamente, el porcentaje de luz difractado por cada holograma (y percibido por los detectores electroópticos) es inversamente proporcional al cuadrado del número de hologramas superpuestos.

Si, en un cristal, 10 hologramas producen una eficiencia de difracción igual al 1 por ciento, 1000 hologramas tendrán una eficiencia de refracción de sólo el 0,0001 por ciento. Este efecto determina el número máximo de hologramas almacenables, porque la pérdida de rendimiento difractivo acaba haciendo que las reconstrucciones sean demasiado débiles para poder detectarlas fiablemente entre el ruido del sistema (fluctuaciones en el brillo de los láseres, dispersión producida por el cristal, electrones generados térmicamente en el detector, y así por menudo). Este número máximo de hologramas se determina a través de la medición de las propiedades ópticas del material cristalino y de las diversas fuentes de ruido que haya en el sistema. En la práctica, cuando la eficiencia de difracción ha caído demasiado para permitir una reconstrucción fiable de las páginas, la tasa con que se detectan datos erróneos —la tasa error/bit— se torna desmesuradamente elevada.

Intensificación de las señales

Buena parte del trabajo encaminado al desarrollo de memorias holográficas consiste en la aplicación de nuevas técnicas tendentes a intensificar las señales ópticas que representan páginas de datos, aumentando su contraste sobre el ruido de fondo. Técnicas cada vez más perfectas han permitido la detección fiable de señales cada vez más débiles: los avances en los métodos de registro holográfico han reforzado las señales grabadas y, por ende, registrar mayor número de páginas en el cristal.

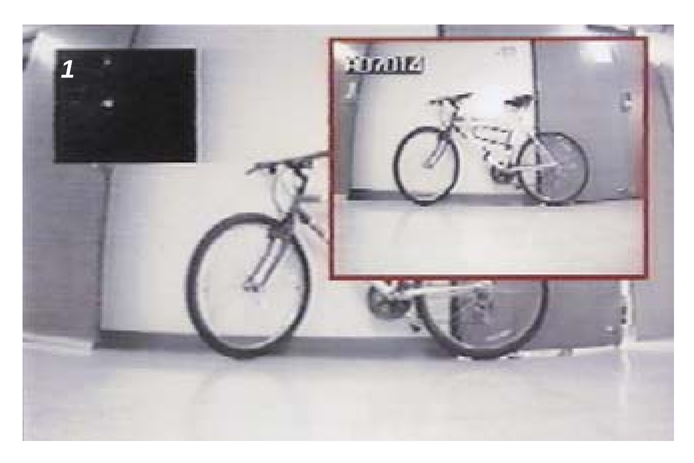
Las primeras tentativas de almacenamiento de muchos hologramas se remontan a los años setenta. Juan J. Amodei, William Phillips y David L. Staebler, de los Laboratorios RCA, registraron 500 hologramas de ondas planas en un cristal de niobato de litio contaminado con hierro. Robert A. Bartolini y otros, también de RCA, almacenaron 550 hologramas de imágenes de alta resolución en un material de polímero fotosensible. Por su parte, Jean-Pierre Huignard, de Thomson-CSF en Orsay, preparó una memoria con 256 localizaciones, capaces, cada una, de almacenar 10 hologramas. Además de almacenar un número bastante alto de hologramas, el sistema de Huignard era una obra de ingeniería excepcional.

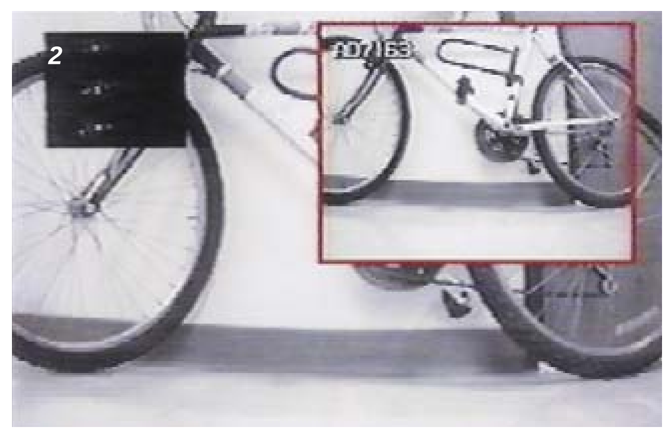
Por impresionantes que fueran algunos de estos esfuerzos, ninguno de ellos desembocó en un sistema práctico. Las memorias magnéticas y las de semiconductores estaban progresando por entonces con gran rapidez, haciendo que otras técnicas más exóticas no llamaran la atención. Las memorias holográficas fueron gradualmente perdiendo protagonismo.

En 1991 comenzó un renacimiento, cuando uno de nosotros (Mok), con financiación del Departamento de Defensa, exhibió el almacenamiento y recuperación con alta fidelidad de 500 imágenes holográficas de alta resolución de tanques, transportes todoterreno y otros vehículos militares en un cristal de niobato de litio con trazas de hierro.

Vinieron a continuación diversas teorías y experimentos nuevos. En 1992 almacenamos 1000 páginas de datos digitales en un centímetro cúbico de cristal de niobato de litio contaminado con hierro. Cada página almacenada contenía 160 por 110 bits tomados de la memoria electrónica ordinaria de un ordenador personal. Acto seguido volvimos a copiar en la memoria del ordenador digital varios segmentos de los datos almacenados y no detectamos errores. Este experimento demostró que el almacenamiento holográfico puede ofrecer suficiente precisión a los ordenadores digitales.

Se empleó un dispositivo similar para almacenar 10.000 páginas, máximo conseguido hasta ahora con un solo cristal. Cada una de estas páginas medía 320 por 220 bits, así









que el sistema podía almacenar en total un poco menos de 100 millones de octetos (100 megabytes). Realizamos este experimento en 1993 en el Instituto de Tecnología de California, contando con la colaboración de Geoffrey Burr.

La mayoría de los 10.000 hologramas almacenados consistían en configuraciones binarias aleatorias, similares a los datos que puede almacenar un ordenador normal. La tasa bruta de error (sin corrección) fue de 1 bit erróneo por cada 100.000 evaluados. Una tasa así se sobra para el almacenamiento de datos pictóricos, en particular si éstos no se han comprimido ni manipulado con el propósito de reducir el número de bits necesarios para la representación de la imagen. Entre las páginas se incluyeron también varias fotografías de rostros y el logotipo de Caltech, para poner de manifiesto que en una memoria holográfica resulta fácil combinar imágenes y datos. La información contenida en los 10.000 hologramas solamente ocuparía la octava parte de la capacidad disponible en un disco compacto de tipo ordinario. Pero resulta posible fabricar memorias holográficas de capacidad mucho mayor almacenando hologramas en multitud de ubicaciones del cristal. Nosotros, por ejemplo, exhibimos un sistema en el que hay 10.000 páginas de datos almacenadas en cada una de 16 ubicaciones, lo que da un total de 160.000 hologramas.

En 1994, John F. Heanue, Matthew C. Bashaw y Lambertus Hesselink, todos de la Universidad de Stanford, almacenaron en una memoria holográfica imágenes digitizadas y comprimidas, así como datos de vídeo, y recuperaron la información sin pérdida apreciable de calidad pictográfica. Almacenaron 308 páginas, cada una de las cuales contenía 1592 bits de datos “en rama”, en cuatro posiciones distintas y separadas de un mismo cristal. El grupo de Stanford se valió de una combinación de técnicas, electrónicas algunas, ópticas otras, para mantener bajo control las tasas de bits erróneos. Así, añadieron unos cuantos bits adicionales a cada ristra de ocho bits destinados a corregir errores de un bit, cualquiera que fuera su posición en la ristra. Este código de corrección de errores redujo la tasa de errores desde un bit en cada 10.000 hasta un bit por millón.

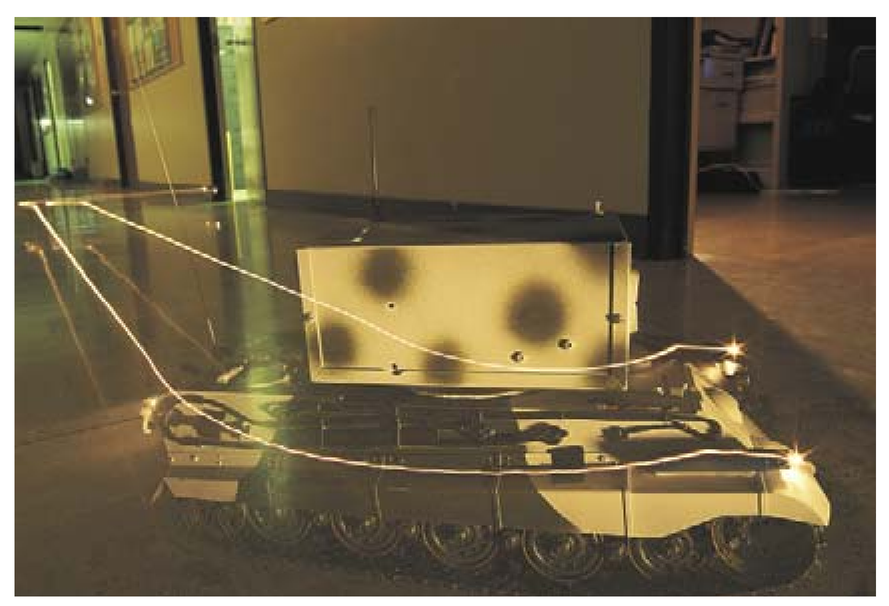
Otra importante ventaja que podrían tener las memorias holográficas sería el acceso aleatorio rápido por medios no mecánicos. En cuerpos sólidos, para la deflexión de un haz luminoso de referencia se pueden utilizar ondas sónicas de alta frecuencia, al objeto de seleccionar y leer cualquier página de datos en decenas de microsegundos, frente a las decenas de milisegundos típicas de los movimientos mecánicos de las cabezas de lectura de los discos ópticos y magnéticos al uso. En el centro de investigación que la empresa Rockwell tiene en Thousand Oaks, John H. Hong y Ian McMichael han diseñado y realizado un sistema compacto capaz de almacenar 1000 hologramas en cada una de 20 ubicaciones. Se tarda menos de 40 microsegundos en acceder a una página cualquiera; la recuperación de datos se consigue sin error.

La promesa de los polímeros

Lo mismo que en el caso de los experimentos originales de los años setenta, en estas demostraciones se utilizaron cristales de niobato de litio dopado con hierro. Al ser iluminados con una configuración óptica —como un holograma creado por intersección de dos haces de láser— en el seno del cristal tiene lugar una migración de partículas cargadas, que producen un campo eléctrico cuya modulación remeda la







3. UN VEHICULO GUIADO POR HOLOGRAMAS navegó con plena autonomía por el laboratorio de los autores en el Instituto de Tecnología de California. Cada fotografía compuesta de esta secuencia muestra lo que veía una videocámara montada en el vehículo (*imagen principal*), junto con otra imagen (*inserto*) que se le transmitía al vehículo desde una memoria holográfica. Para navegar, el vehículo (*que vemos arriba*) se orientaba por sí solo hasta que la imagen de su cámara coincidía con la procedente de su memoria. Los puntos luminosos del otro inserto, menor, indican hasta qué punto están en sincronía ambas señales. En esta serie, el vehículo reconoció inicialmente una bicicleta y se aproximó a ella. Seguidamente salió de dudas por la imagen que vería tras un giro a la izquierda, que descubrió tras buscar un poco.

del motivo óptico original. La forma en que el cristal difracta después la luz depende de este campo eléctrico: cuando se ilumina el cristal bajo un ángulo correcto, la luz se difracta de suerte tal que se reconstruye el holograma original. El fenómeno recibe el nombre de efecto fotorrefractivo.

En 1994 entró en el mercado, desarrollado por Du Pont, un material holográfico de distinto tipo. Este material, de los denominados fotopolímeros, expuesto a la luz, en lugar de cambios en su fotorrefringencia, los experimenta de naturaleza química. No hay cargas eléctricas excitadas y las alteraciones fotoquímicas son permanentes, esto es, no cabe borrar la información y grabar en su lugar otra nueva. Por consiguiente, este medio sirve nada más que para memorias grabadas una sola vez, o sea, memorias de sólo lectura. Alcanza, sin embargo, un rendimiento refractivo 2500 veces mayor que el de un cristal de niobato de litio de igual espesor. Uno de los autores (Psaltis) colaboró con Allen Pu, del Caltech, y con Kevin Curtis, de los Laboratorios AT&T, en un experimento en el cual almacenamos 1000 páginas de configuraciones de bits en una película de polímero de 100 micras de espesor. Recuperamos los datos sin que se detectaran errores.

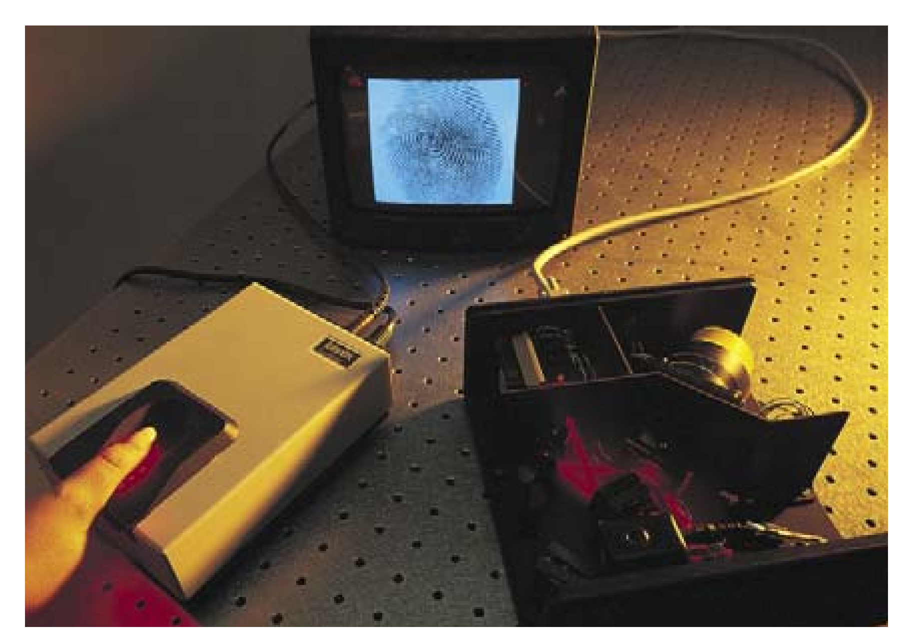
Investigadores de IBM y de la Universidad de Arizona han comenzado a experimentar con películas de polímeros que, al igual que el niobato de litio, manifiestan el efecto fotorefractivo. Pese a lo prometedores que parecen los avances en materiales holográficos poliméricos, aún es demasiado pronto para desechar el niobato de litio, el cual, últimamente, ha mostrado también mayor versatilidad. Así, se han preparado cristales de niobato de litio contaminados con ligerísimas cantidades de cerio y hierro, que son sensibles a la luz roja. Estos cristales indican la manera en que podemos grabar los cristales con láseres de semiconductores, diminutos y económicos, en vez de los verdes o verdiazules, que son mucho más costosos.

En parte prestado, en parte nuevo

Los cristales de niobato de litio dopados con hierro utilizados en las demostraciones recientes no son el único elemento superviviente de los experimentos de veintitantos años atrás. También los láseres de argón son los mismos. Y entonces, al igual que ahora, se confió en la multiplexación angular. ¿Qué novedades, pues, han resucitado el almacenamiento holográfico de datos?

El avance más importante se cifra en la aparición de una madura industria optoelectrónica, que ha producido los dispositivos económicos, compactos y energéticamente eficientes necesarios para la construcción de memorias holográficas grandes y para su acoplamiento a los ordenadores digitales. Así, por ejemplo, los diminutos láseres de semiconductores que emiten luz roja, desarrollados en principio para comunicaciones por fibra óptica, pueden servir de fuentes luminosas lo mismo con cristales de niobato de litio contaminado con hierro o cerio que con el fotopolímero de Du Pont. Las grandes matrices detectoras, construidas para cámaras de televisión, que toman una imagen y la convierten en señales electrónicas, sirven para leer la salida de la memoria. Las pantallas de cristal líquido diseñadas en un comienzo para proyectores de vídeo sirven ahora de dispositivos de entrada, creando las configuraciones de puntos brillantes y oscuros que representan páginas de datos.

Tales progresos técnicos hicieron posibles las recientes demostraciones



4. UNA CERRADURA HOLOGRAFICA que almacena hasta 1000 huellas dactilares. Para entrar en ciertas salas, el usuario ha de colocar un dedo sobre una placa de cristal; su huella ha de coincidir exactamente con una de las de la memoria, almacenadas mediante hologramas. La memoria rápida minimiza la demora mientras el sistema busca alguna que coincida. Este tipo de dispositivo se está desarrollando por la compañía japonesa Hamamatsu. Se vale de la memoria holográfica mostrada aquí, producida por Holoplex, pequeña compañía fundada por los autores en Pasadena.

de memoria, las cuales, a su vez, suscitaron nuevas investigaciones en los problemas físicos subyacentes. Por ejemplo, las memorias holográficas han sufrido desde antiguo el problema del ruido de interferencia entre canales ("cross talk"), consistente en la lectura parcial, espontánea e indeseada de datos almacenados, y que causa débiles imágenes fantasmas, de todas las páginas reclamables mientras se está accediendo solamente a una. Se conocen bien el fenómeno de interferencia y sus causas; podemos, pues, calcular y contrarrestar su efecto en cualquier supuesto de grabación, ajustando parámetros como el ángulo entre los haces de señal y de referencia, el ángulo entre los haces de referencia en una grabación multiplexada y las propiedades geométricas de la página de datos.

Otro subproducto de los trabajos teóricos ha sido el desarrollo de nuevos métodos de multiplexación y el refinamiento de los ya existentes, que podrían reemplazar o complementar la multiplexación angular, facilitando nuevas opciones al proyectista del sistema. En una de las alternativas, estudiada simultáneamente en la Universidad estatal de Pennsylvania y en el Caltech, las páginas sucesivas se van registrando con haces de referencia de distinta longitud de onda. También se han exhibido haces de referencia codificados con un patrón diferente para cada página en la Universidad de California en San Diego e, independientemente, en el Instituto Optico de Orsay.

Aumentar el volumen

Se celebran obviamente las nuevas técnicas de multiplexación, más perfectas. Pero si se aspira a que las memorias holográficas se abran paso en el territorio de los discos compactos se requerirán medios para aumentar mucho su capacidad. Se ha demostrado que las memorias holográficas del presente son mucho más rápidas que los sistemas de discos compactos, pero la velocidad rara vez basta por sí sola para que una técnica nueva desplace a otra ya firmemente atrincherada. A grandes rasgos, lo que se necesita es otra ventaja de carácter básico, como la mayor capacidad de almacenamiento.

Una de las formas de aumentar el almacenamiento en una memoria holográfica consistiría en enlosetar una superficie bidimensional con cristales de memoria similares a terrones de azúcar, técnica denominada multiplexación espacial. Según cabía esperar, la capacidad de tal sistema es proporcional al número de cubos. Los datos se almacenan en cada uno de los cubos, en forma de hologramas angularmente multiplexados.

Los sistemas de este tipo plantean el problema del montaje óptico, que ha de ser capaz de direccionar los cubos, uno por uno. Entre las soluciones se cuenta el disco tridimensional, o estereodisco, similar en muchos aspectos a un disco compacto normal. El soporte de grabación, discoidal, se coloca sobre una base giratoria; sobre ella se monta un cabezal láser de lectura y escritura. La rotación del disco conjugada con la exploración en sentido radial de la cabeza permite iluminar cualquier lugar del disco. Psaltis propuso la idea en 1992; a principios de 1995, Pu construyó un sistema basado en ella.

Lo mismo que en cualquier medio holográfico, los datos se almacenan en el volumen entero de la capa de grabación del estereodisco. La cabeza dispone de una matriz de detectores, capaz de leer de una vez toda una página de datos, y de un deflector de haz para la multiplexación angular. También podría incorporarse en el cabezal un modulador espacial de luz, que inscribiera la página de datos en el haz de señal (así, la pantalla de cristal líquido utilizada actualmente en las demostraciones).

Aunque el estereodisco almacena información en tres dimensiones, puede computarse el número de bits que en teoría podrían almacenarse por micra cuadrada de superficie discal al objeto de comparar esta densidad areolar con la de un disco compacto ordinario. Tal comparación es razonable, porque un estereodisco puede ofrecer la finura de un disco compacto. Resulta que para espesores menores que dos milímetros, la densidad areolar de disco holográfico es aproximadamente proporcional al espesor del medio donde se efectúa el registro. En su demostración en el Caltech, Pu consiguió una densidad superficial de 10 bits por micra cuadrada en un disco provisto de una película de polímero de 100 micras de espesor (máximo disponible para este material concreto). Tal densidad decuplica la de un compacto ordinario.

Además, es posible incrementar la densidad superficial por el sencillo expediente de aumentar el espesor de la capa holográfica. Con un material de un milímetro de espesor serían posibles densidades de 100 bits por micra cuadrada. Un estereodisco tal tendría un tamaño y un peso casi idénticos al de un compacto convencional, pero almacenaría en cambio unas cien veces más información.

Esta senda la ha tomado Holoplex, pequeña empresa que los autores han fundado en Pasadena. La compañía

ha construido un sistema de memoria de alta velocidad capaz de almacenar hasta 1000 huellas dactilares, para utilizarse a modo de llave en ciertos edificios o salas de acceso restringido. Aunque la capacidad de este sistema viene a ser la mitad que la de un disco compacto, su contenido completo puede leerse en un segundo. Holoplex trabaja ahora en otro producto capaz de almacenar hasta un billón de bits, o sea, unas 200 veces más que en un disco compacto.

Memoria por asociación

Antes de que tal "súper CD" sea realidad comercial, las memorias holográficas podrían aplicarse en sistemas especializados de alta velocidad. Algunos de ellos podrían sacar partido de la naturaleza asociativa del almacenamiento holográfico, peculiaridad expuesta por Dennis Gabor, premio Nobel de 1971 por la invención de la holografía.

Dado un holograma, uno cualquiera de los dos haces que se interfirieron para crearlo puede emplearse para reconstruir el otro. Ello significa que en una memoria holográfica no solamente es posible orientar con cierto ángulo un haz de referencia hacia el interior del cristal, con el fin de seleccionar una página holográfica individual, sino que cabe también la operación inversa: la iluminación de un cristal con una de las imágenes almacenadas produce una aproximación del haz de referencia asociado, reproducido en forma de onda plana que emana del cristal en el ángulo adecuado.

Esta onda puede enfocarse mediante una lente hasta formar un punto diminuto, cuya posición lateral está determinada por el ángulo, revelando en consecuencia la identidad de imagen ingresada. Si se ilumina el cristal con un holograma que no se cuenta entre las configuraciones almacenadas, se producirán múltiples haces de referencia y, por tanto, múltiples puntos enfocados. El brillo de cada punto es proporcional al grado de semejanza entre la imagen "de entrada" y cada una de las configuraciones almacenadas. Dicho de otro modo, la disposición de los puntos constituye una codificación de la imagen ingresada, expresada en función de su semejanza con la base de datos de imágenes almacenadas.

En el Caltech, hace meses, Pu, Robert Denkewalter y Psaltis se valieron de una memoria holográfica en esta modalidad para guiar un cochecito por los pasillos y laboratorios del pabellón de ingeniería eléctrica. Almacenamos imágenes seleccionadas de las salas y pasillos en una memoria holográfica conectada a un ordenador digital instalado en una mesa del laboratorio y lo pusimos en comunicación con el coche mediante un enlace de radio. Una cámara de televisión montada en el coche proporcionaba información visual. Al maniobrar el coche, el ordenador comparaba las imágenes tomadas por la cámara con las de la memoria holográfica. En cuanto espiaba una escena familiar, guiaba al vehículo a lo largo de una de las diversas rutas prescritas, definidas cada una mediante una secuencia de imágenes evocadas de la memoria. En ésta se almacenaban unas 1000, pero se descubrió que, para navegar por varias salas del edificio, solamente se necesitaban 53.

Estamos diseñando ahora un vehículo diferente, al que confiamos poder dotar de una memoria suficiente para que viaje con autonomía. A pesar de lo enorme de tal capacidad, el paralelismo de la memoria holográfica permitiría que la información almacenada se reclamara con rapidez suficiente para que el vehículo recorriera las calles y evitara los obstáculos. A decir verdad, la navegación puede constituir una de las aplicaciones especializadas que generen el impulso necesario para catapultar la técnica al campo de aplicación.

Tal aceptación puede tardar años. Pero conforme aumente la necesidad de almacenar ingentes cantidades de datos, también lo hará la comodidad de almacenar datos en tres dimensiones, y no sólo en dos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANGLE-MULTIPLEXED STORAGE OF 5000 HOLOGRAMS IN LITHIUM NIOBATE. Fai H. Mok en *Optics Letters*, volumen 18, n.º 11, págs. 915-917; junio de 1993.

THREE-DIMENSIONAL HOLOGRAPHIC DISKS. Hsin-Yu Sidney Li y Demetri Psaltis, en *Applied Optics*, vol. 33, n.º 17, págs. 3764-3774; 10 de junio de 1994.

SELECTED PAPERS ON HOLOGRAPHIC STORAGE. Compilación de Glenn T. Sincerbox. SPIE Milestone Series, vol. MS 95. SPIE Optical Engineering Press, 1994.

VOLUME HOLOGRAPHIC MEMORY SYSTEMS: TECHNIQUES AND ARCHITECTURES. John H. Hong, Ian McMichael, Tallis Y. Chang, William Christian y Eung Gi Paek en *Optical Engineering*, vol. 34. n.º 8, págs. 2193-2203; agosto de 1995.

Los acuíferos kársticos españoles

Las calizas y dolomías constituyen acuíferos kársticos que deben desempeñar un papel relevante en la gestión de los magros recursos hídricos de que dispone España

Antonio Pulido Bosch

La sequía que padece nuestra nación hace imperioso el conocimiento de todos los recursos hídricos disponibles. Los acuíferos kársticos son uno de ellos. Los acuíferos kársticos españoles reúnen unos 20.000 hectómetros cúbicos al año. Su contribución al abastecimiento de las demandas totales de agua resulta muy considerable, aunque puede extraérseles mayor rendimiento si se crearan, o mejoraran, los sistemas de captación y regulación.

El karst presenta una gran diversidad morfológica. En su aspecto externo se nos ofrece en forma de dolinas, uvalas, poljes y cañones. Por dentro, lo constituyen cavidades, conductos, estalactitas y estalagmitas; formas mixtas son las simas y las surgencias, que conectan el exterior con el interior. Ciertas notas características, además, acompañan al karst: no suele haber cursos de agua permanentes en su exterior, la circulación del agua en el subsuelo es muy activa y en los bordes de los macizos surgen manantiales de caudales variables en el tiempo y en el espacio.

El término karst designa, además de un paisaje peculiar, el efecto de los procesos de corrosión y erosión sobre las rocas, así llamadas, karstificables. En España se superan los 100.000 kilómetros cuadrados de materiales carbonatados susceptibles de karstificación, asiento de paisajes y formas de notable singularidad y riqueza. Esta cifra aumenta sensiblemente si tomamos en consideración la continuación en profundidad de estos materiales bajo rellenos de distinta composición mineralógica.

Además de los carbonatos, existen otros materiales, los pseudokársticos, que pueden constituir acuíferos. Pertenecen a éstos las evaporitas y los yesos; los segundos afloran o subafloran a lo largo de 30.000 kilómetros cuadrados. Los materiales conglomerados también pueden alcanzar interés local.

Material carbonatado no es obligatoriamente sinónimo de acuífero kárstico, aunque sobre este tema divergen las opiniones. Hubo quienes negaron la existencia de acuíferos dentro del karst, para admitir sólo la presencia de unas “redes kársticas” desconectadas entre sí, a la manera de los cauces de superficie. E. A. Martel fue a principios de siglo el principal defensor de esta idea, que se formó a partir de sus continuas observaciones subterráneas.

En oposición frontal militaron, por las mismas fechas, A. Grund y J. Cvijic, quienes defendieron la existencia del acuífero kárstico con una franja saturada continua, al igual que sucede en un medio de porosidad intergranular; las discontinuidades del subsuelo estarían conectadas entre sí.

Hoy en día pocos investigadores aceptan la tesis de Martel, aunque se admite que no todo acuífero carbonatado debe considerarse kárstico. Para que así sea, ha de existir un flujo organizado a lo largo de conductos preferenciales, con la consiguiente anisotropía y heterogeneidad. Además, la ley de Darcy —según la cual la velocidad del agua subterránea varía linealmente con el gradiente hidráulico y con la permeabilidad del material— no se cumple en la mayor parte del acuífero, muy especialmente en aguas altas (flujo turbulento, pérdidas de carga no lineales, etcétera).

De acuerdo con el modelo que goza de mayor aceptación, el acuífero kárstico consta de dos elementos principales: transmisivo y capacitativo. El elemento transmisivo estaría constituido por toda una red de discontinuidades de gran facilidad de evacuación de caudales (grandes fracturas ensanchadas por los procesos de karstificación); el volumen que ocuparían, con respecto al total del macizo, sería muy bajo. El elemento capacitativo estaría constituido por los bloques que quedan separados por las fracturas transmisivas, y deberían su capacidad de almacenamiento a las discontinuidades de orden menor existentes en el bloque y a la porosidad de la roca. La porosidad intergranular remite a los huecos que dejan entre sí los granos que integran las rocas detríticas, como gravas o arenas; dicha porosidad se expresa en porcentaje de huecos con respecto al volumen total de roca. Cuando la porosidad es muy elevada, se habla de acuíferos de doble porosidad.

Otros autores abogan por un modelo de acuífero “jerarquizado”, al que llegan tras el análisis de los procesos de karstificación y de cómo evolucionan los conductos generados. En su opinión, las discontinuidades por donde penetra el agua en el macizo se agrandan con su paso, lo que aumenta la posibilidad de infiltrar mayores caudales, que, a su vez, contribuye a un desarrollo ulterior de la discontinuidad. Se tendría, así, una red de muchísimos conductos pequeños en las áreas de alimentación, cuyo número mermaría y cuya sección se dilataría conforme se aproximaran hacia el área de drenaje. (Esta interpretación recuerda otro modelo ideado para la red de drenaje de los ríos, con el añadido de que admite la existencia de una zona saturada.) Las principales observaciones realizadas por los defensores del acuífero jerarquizado se han hecho en áreas montañosas abruptas y de elevada cantidad de precipitación.

ANTONIO PULIDO BOSCH se formó en la Universidad de Granada, donde ejerce hoy funciones docentes. Su línea esencial de investigación es la hidrogeología kárstica en sus aspectos cuantitativos y cualitativos.

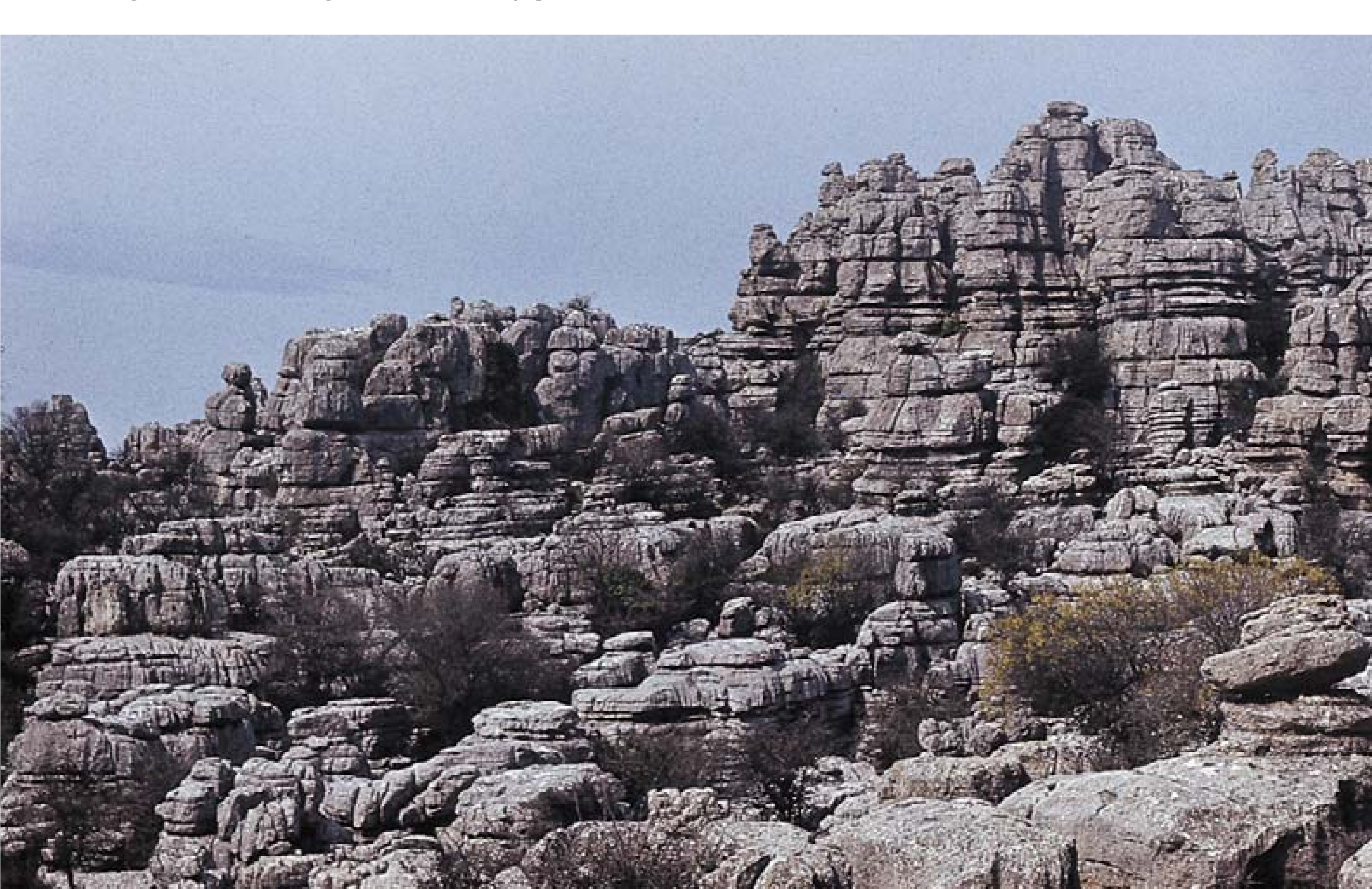
Para resolver las dificultades que plantean ambas hipótesis se ha propuesto un modelo intermedio. Por un lado, admite la existencia de una geometría fractural, capaz de configurar una red tridimensional de bloques y conductos; por otro, hace intervenir los procesos de karstificación, que, por su propia dinámica, tienden a jerarquizar el flujo. Este tercer modelo explica el diferente rendimiento medio que obtienen los sondeos situados en las áreas de descarga (rendimientos elevados) con respecto a los situados en las zonas de recarga (rendimiento significativamente menor).

A los conductos transmisivos se debe que las crecidas en los acuíferos kársticos sean muy notables, con caudales muy superiores a los de estiaje. El clima desempeña un papel preponderante en todos los procesos que intervienen en la generación del acuífero kárstico, de manera que, a igualdad de litología, las áreas de mayor pluviosidad tendrán redes más desarrolladas. Ello da pie a que algunos —así A. Mangin al estudiar el caso cubano— introduzcan el concepto de funcionalidad dentro del karst. Este deja de ser funcional cuando la red que lo drena alcanza una extensión excesiva con respecto al caudal circulante; al ser bajos entonces los gradientes, no habrá flujo turbulento. La falta de funcionalidad de muchos acuíferos kársticos podría ser el resultado de la existencia de una elevada porosidad de la matriz rocosa.

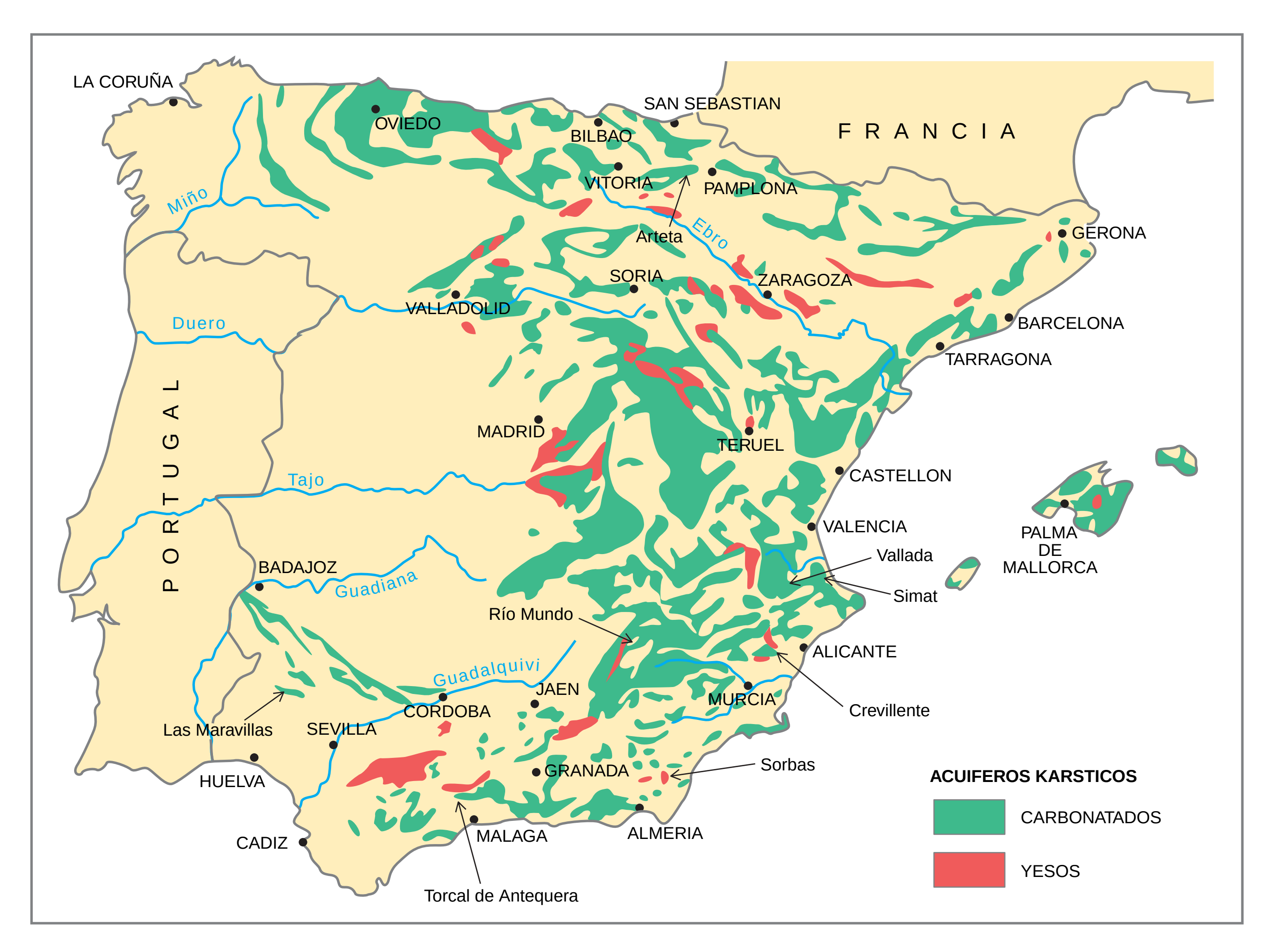
Como suele suceder cuando se diseñan modelos discrepantes, el medio natural en que dicen apoyarse cubre toda una gama continua entre los extremos. En el caso español se tienen ejemplos de acuíferos kársticos altamente jerarquizados junto a otros de características muy parecidas al del medio de porosidad intergranular; en el área mediterránea predomina este último.

El acuífero del Torcal de Antequera es representativo de un medio de porosidad intergranular. Ocupa 28 kilómetros cuadrados. Está constituido por calizas jurásicas de gran pureza y potencia, con un tramo dolomítico basal. Lo rodean materiales margosos y arcillosos de diferentes unidades tectónicas. La fracturación del macizo es muy densa. Abundan el lapiaz de diversos tipos, las kaménicas (pilones en la terminología local), corredores según las líneas de fractura, dolinas, “pilas de platos” y el famoso “tornillo”. No se conocen cavidades de desarrollo notable, aunque se han topografiado una docena de simas, la más profunda de las cuales alcanza 130 metros.

La precipitación media anual supera en el Torcal los 800 milímetros, con notable amplitud entre los años más seco y más húmedo. La morfología de la parte alta del macizo es muy favorable a la infiltración de la precipitación. El agua infiltrada brota esencialmente por el manantial de La Villa, surgencia situada en el punto más bajo del macizo, empleada para el abastecimiento de la ciudad de Antequera. Según ha comprobado J. P. Thauvin, la infiltración varía allí entre el 51 y el 55 % de la precipitación medida.



1. LOS AFLORAMIENTOS CARBONATADOS presentan numerosas formas superficiales, alcanzando, en muchos casos, singular belleza. El Torcal de Antequera constituye uno de los paisajes exokársticos más bonitos del mundo.



2. LOS ACUIFEROS KARSTICOS ocupan una parte importante de España; el mapa ilustra la distribución espacial de los afloramientos de carbonatos y de yeso. Se indica la situación de los acuíferos citados en el texto.

Gracias al seguimiento que desde 1974 se viene haciendo del Torcal, sabemos que el caudal máximo se acerca a los 1800 litros por segundo. Más difícil de medir resulta el mínimo, por la sencilla razón de que el manantial se capta directamente en el punto de surgencia.

Los análisis de correlación y espectral aplicados a las series de caudales y precipitaciones del Torcal pusieron de manifiesto el gran poder regulador del sistema, corroborado posteriormente mediante deconvolución. La realización de un sondeo mecánico junto a la surgencia, en 1977, permitió bombear 200 litros por segundo; la interpretación de la prueba de bombeo realizada por el entonces denominado Instituto Geológico y Minero de España arrojó un valor de la transmisividad de 60.000 metros cuadrados por día y del 10 % para el coeficiente de almacenamiento. Posteriormente se realizó un modelo matemático de simulación asimilando el Torcal a un medio equivalente de porosidad intergranular, aunque incluyendo un sector longitudinal y otro transversal altamente transmisivo. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, empleando como criterio de ajuste el caudal de la surgencia principal.

El acuífero de Arteta, en Navarra, es ejemplo de acuífero de flujo altamente jerarquizado. Los materiales del karst corresponden esencialmente a calizas y dolomías del Paleoceno que descansan sobre areniscas del Maestrichtense; sobre el tramo carbonatado paleoceno reposan alternancias de calizas, margocalizas y margas del Paleoceno superior-Eoceno medio. El conjunto alcanza los 800 metros de potencia. La superficie del acuífero drenada por el manantial es de 55 kilómetros cuadrados. Los materiales triásicos impermeables actúan de condicionantes de la surgencia. Dicha surgencia tiene un caudal medio de 3000 litros por segundo, aunque los extremos se sitúan entre 350 y 30.000 litros por segundo, en estiaje acusado y tras lluvias muy intensas, respectivamente. Los estudios llevados a cabo sobre el mismo estiman un valor del coeficiente de almacenamiento medio inferior al 1 % y valores de la transmisividad "aparente" variables, en función del tiempo, entre 3000 y 30.000 metros cuadrados por día. La heterogeneidad del acuífero es manifiesta.

Las características litológicas, la historia tectónica, el relieve y la vegetación, amén de la climatología, condicionan la karstificación de un área. En el caso de los materiales carbonatados, la presión parcial de CO_2, relacionada con la actividad biológica, resulta decisiva. Con todo, sucede que las aguas del karst alcanzan muy pronto la saturación, es decir, contienen el máximo de calcita en disolución compatible con las condiciones fisicoquímicas; por ello, la progresión en profundidad de la karstificación aparece como algo difícilmente explicable.

Este fenómeno fuerza a admitir la existencia de un nivel de base para la karstificación situado en la propia caliza, a partir del cual no existirían

discontinuidades abiertas susceptibles de almacenar y transmitir el agua. De acuerdo con la teoría propuesta por A. Bögli en 1969, la corrosión por mezclas de aguas inicialmente saturadas, que genera aguas subsaturadas, es uno de los mecanismos que permiten explicar el avance de la karstificación en profundidad, o lateralmente en el caso de acuíferos costeros, según ponen de manifiesto los trabajos de W. Back en Yucatán. A esta corrosión se sumarían los procesos paleokársticos identificados en las cuencas sedimentarias españolas que originarían varias discontinuidades en una misma vertical, siempre y cuando la transgresión posterior no haya obliterado los huecos generados durante la emersión.

Además de los procesos de mezcla y de la paleokarstificación, se puede invocar la influencia del CO_2 de origen profundo, que provocaría un notable aumento del potencial de karstificación, con la peculiaridad de que se asistiría a un proceso de karstificación ascendente en lugar de descendente. En numerosas áreas se detecta la existencia de CO_2 de origen profundo. Esta posibilidad es la que nos lleva a considerar el modelo de acuífero homogéneamente karstificado, que explica muchas de las observaciones realizadas por el autor en las cordilleras Béticas.

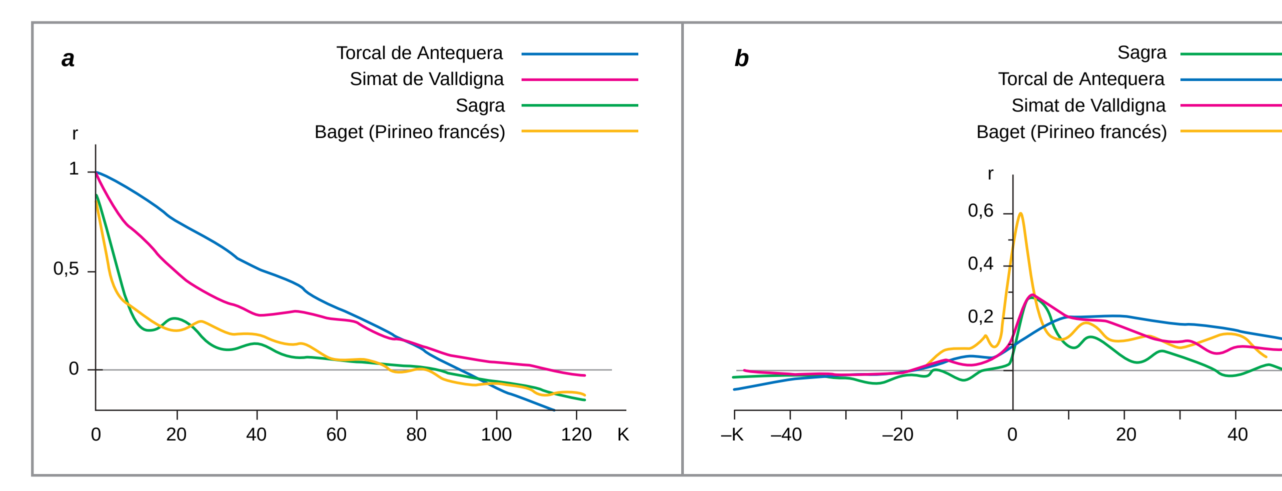
Los procesos de corrosión son más sencillos y rápidos en los yesos, mineral mucho más soluble que la calcita. Existen en España numerosos sistemas kársticos en yesos, aunque en pocos se captan sus aguas. En Siria, donde los yesos ocupan 8000 kilómetros cuadrados de superficie, se dan surgencias de hasta 800 litros por segundo y varios centenares de pozos, según describieron C. Mortier y F. Safadi en 1967.

En el caso de los yesos permanece también abierto el debate sobre los mecanismos de evolución en profundidad de la karstificación. En ellos el agua se satura muy pronto, al tratarse de una reacción rápida. El papel del CO_2 en las calizas lo desempeña, en los yesos, el cloruro sódico, cuya presencia aumenta la solubilidad del yeso. Además del ClNa, la existencia de alimentación vertical ascendente de aguas subsaturadas en iones sulfato, así como los procesos bacterianos de reducción de sulfatos, podrían explicar esta progresión.

Como ejemplo de acuífero en yesos nos sirve el de Sorbas, en Almería. El afloramiento de los yesos messinienses de la cuenca de Sorbas ocupa unos 14 km^2, aunque tienen continuidad en profundidad hasta el "desierto de Tabernas", unos 30 km más al oeste. La formación acuífera alcanza 130 metros de espesor máximo, con intercalaciones pelíticas subsidiarias. Algunos de los estratos superan los 20 metros de potencia. Los yesos reposan sobre margas.



3. LOS YESOS TAMBIEN DESARROLLAN FORMAS exo y endokársticas y pueden almacenar y transmitir importantes cantidades de agua. Los afloramientos de Sorbas (Almería), con más de 600 cavidades inventariadas, constituyen un auténtico paraíso para el especialista y el amante de la naturaleza. Los "túmulos" constituyen una de las formas más conocidas de este macizo.



4. LOS ANALISIS DE CORRELACION, simple y cruzado, permiten caracterizar el funcionamiento kárstico del sistema. Cuanto más tendido es el autocorrelograma (*a*) mayor importancia adquiere el flujo a través de las pequeñas discontinuidades (flujo de base). Correlogramas cruzados (*b*) muy agudos ponen de manifiesto la existencia de una red de conductos kársticos funcional. En los esquemas, *r* representa el valor de las funciones de autocorrelación (*a*) y de correlación cruzada (*b*) para cada valor de *K* (paso de tiempo = 0, 1, 2, 3, ... *m*, siendo *m* el valor de truncadura).



5. EL NACIMIENTO DEL RIO MUNDO, punto de emergencia de la Cueva de los Chorros, constituye una surgencia de gran curiosidad dentro de la tipología de manantiales kársticos; no cumple la regla general de encontrarse en la cota más baja y a lo largo del contacto material carbonatado-no carbonatado.

Desde el punto de vista morfológico, el área se caracteriza por una notable abundancia de formas exo y endokársticas. Dentro de las primeras destacan numerosas dolinas y un polje de 1200 × 500 metros. Además de diferentes tipos de lapiaz, existen numerosos túmulos, suerte de abombamiento, circular o elíptico, de una franja superficial. Muchas dolinas proceden del hundimiento de conductos subsuperficiales o del ensanchamiento de simas, que actúan de conexión entre las formas exo y endokársticas. Se han inventariado más de 600 de estas simas o cavidades, dos de las cuales superan los 6 kilómetros de conductos transitables (Covadura y Cueva del Agua).

El acuífero ligado a los yesos drena esencialmente a través del manantial de Los Molinos, con un caudal que raramente es inferior a 20 litros por segundo, aunque puede alcanzar puntas de varios cientos de litros por segundo. Sus aguas presentan facies sulfatada cálcica muy manifiesta, con valores de conductividad comprendidos entre 3200 y 4500 microsiemens por centímetro. El hecho de que la surgencia principal nunca se haya secado, incluso tras más de 10 meses sin lluvias, hace pensar en el elevado poder regulador de estos yesos.

La cordillera Ibérica es la que presenta la mayor superficie aflorante de carbonatos, seguida de la Bética, cornisa Cantábrica y Pirineo, y la cordillera Catalana. No obstante, la mayor explotación se lleva a cabo en la cordillera Bética, en los sectores más poblados y de climatología más favorable a las explotaciones agrícolas intensivas y de notable aridez. En las demás áreas, aunque no se bombee en los acuíferos kársticos, sus importantes recursos son captados en las surgencias o contribuyen mayoritariamente al mantenimiento del caudal de base de los ríos.

Para llegar a la cifra de los recursos hídricos asociados a los acuíferos kársticos españoles, mencionada en el comienzo del artículo, se parte de una superficie de 100.000 kilómetros cuadrados y una infiltración media de 200 milímetros anuales, con lo que se alcanzan los 20.000 hectómetros cúbicos al año. También se puede obtener un orden de magnitud de las reservas de estos macizos a partir de un espesor saturado medio de 100 metros y un coeficiente de almacenamiento del 2 %; se deducen así los 200.000 hectómetros cúbicos referidos.

Los acuíferos kársticos difieren de los detríticos. Esas divergencias son, unas, ventajosas, y otras, inconvenientes. Citemos algunos puntos de comparación. En primer lugar, los valores de infiltración; en el caso de los kársticos, esos valores se hallan entre el 15 % y el 85 %, con valores medios cercanos al 45 % de la lluvia caída; en los acuíferos detríticos los valores medios son mucho más bajos. En segundo lugar, en los kársticos se pueden obtener elevados caudales en los sondeos de captación (superiores a 100 litros por segundo) aunque, al propio tiempo, el riesgo de que un sondeo resulte negativo es más elevado que en un acuífero detrítico. En tercer lugar, el valor medio del coeficiente de almacenamiento suele ser bajo y raramente superior al 5 %, lo que se traduce en la existencia de reservas menores que en un acuífero detrítico, a igualdad de volumen de acuífero.

En cuarto lugar, en los acuíferos kársticos existe una componente rápida o muy rápida del flujo, con la consiguiente propagación inmediata de posibles contaminantes; a ello se une el hecho de que las formas abiertas permiten el acceso directo de los contaminantes a la franja saturada. Por esa razón, los acuíferos kársticos suelen incluirse dentro de los “altamente vulnerables a la contaminación” y con menor poder de autodepuración que un acuífero detrítico.

Además, en los acuíferos costeros, y debido a que el contacto agua dulce-agua de mar suele ser una franja de elevada karstificación, la interfase suele presentar un aspecto horizontal, que facilita la intrusión marina en la explotación de estos acuíferos mediante bombeo. Por último, se han descrito algunos colapsos inducidos por la explotación de acuíferos kársticos.

Tradicionalmente, la investigación de las aguas subterráneas en el karst se fundó en la exploración espeleológica y, sobre todo, en el estudio de los caudales de las surgencias. Pero la mera observación directa en las cavidades y ríos subterráneos apenas permitió avanzar hasta que se llevaron a cabo los primeros ensayos con trazadores, que aportaron valiosa información geométrica e hidrodinámica (velocidad, tiempo de tránsito, posible organización del flujo de acuerdo con la curva de restitución y otros).

El análisis de los caudales de surgencias kársticas permitió abordar cuantitativamente la hidrogeología del karst, aunque se trabajó con la curva de agotamiento según el método de Maillet o, a lo sumo, con la curva de recesión (método de Mangin). El elemento de partida es el hidrograma, gráfico que representa la variación del caudal del manantial con el tiempo; la forma del hidrograma es función de la entrada al sistema, es decir, de las lluvias, y de las características internas del acuífero. Al fragmento del hidrograma no influenciado directamente por la infiltración de la precipitación se denomina agotamiento; la recesión, por su lado, corresponde al tramo que se inicia en la punta del hidrograma, o caudal máximo, e incluye el agotamiento. Así llegó a conocerse la organización del flujo y el grado de karstificación y funcionalidad del acuífero.

Se dio luego un salto cualitativo con la ampliación del estudio a la totalidad del hidrograma. En efecto,

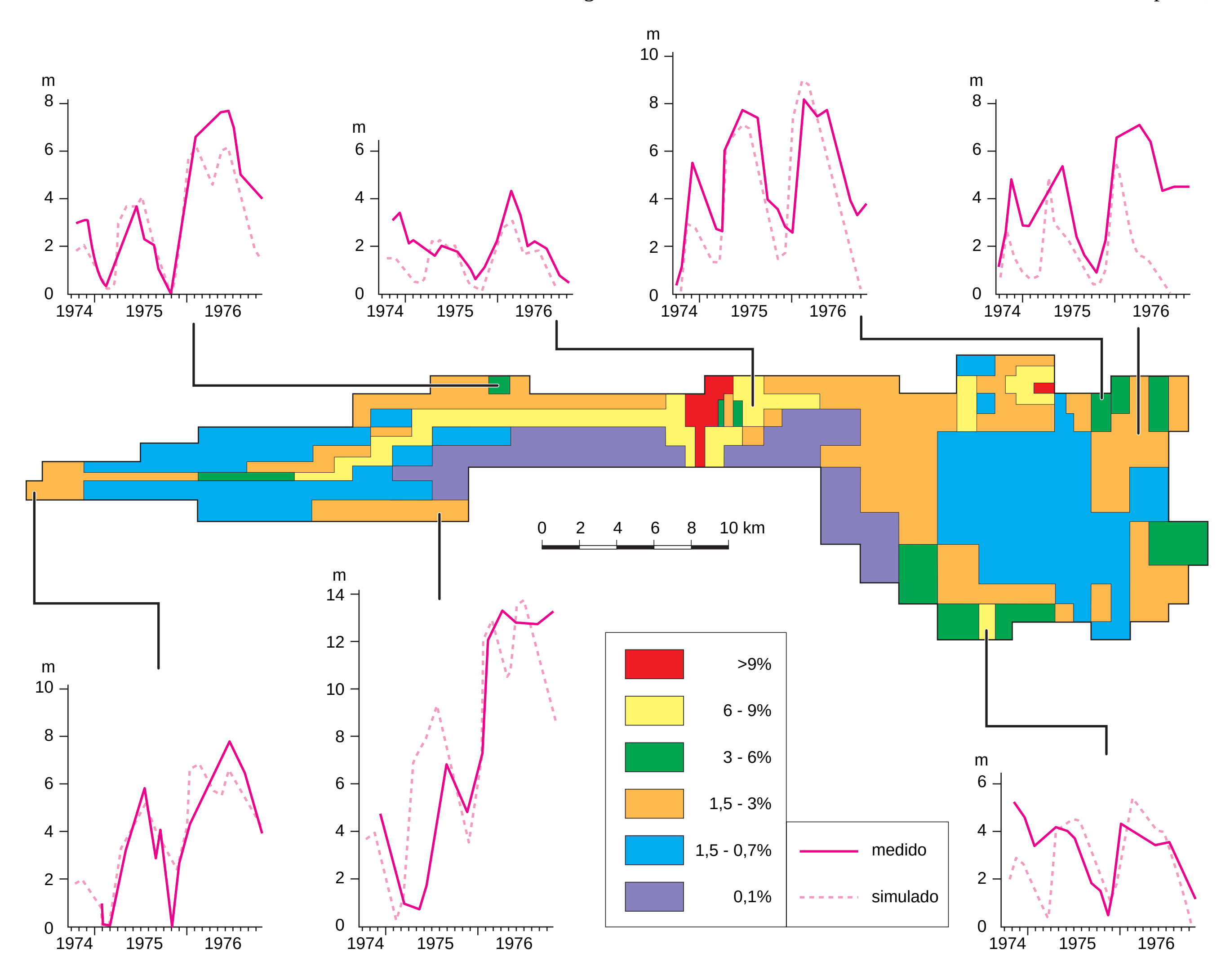
mediante los análisis de correlación y espectral, simple y cruzado, y la deconvolución, realizados por G. de Marsily y aplicados a las series temporales de lluvias (señal de entrada) y caudales (señal de salida), se ha podido cuantificar la memoria del sistema, el poder regulador y, en suma, el grado de funcionamiento de las discontinuidades existentes en el acuífero, relacionado con la mayor o menor facilidad de explotación y regulación de los recursos.

Los análisis de correlación permiten determinar el grado de relación que guardan los valores que puede tomar una variable (caudal de una surgencia o la lluvia, por ejemplo) a lo largo del tiempo. Si, en un análisis simple, esa variable se compara consigo misma obtendremos un autocorrelograma. Pero si, en un análisis cruzado, se compara la variable en cuestión con otras con las que está vinculada (caudal y lluvia en un macizo kárstico, por ejemplo), resultará un correlograma cruzado. Cuando se trabaja en el dominio de las frecuencias, en vez del dominio de la secuencia temporal, se tiene un análisis espectral, que puede ser también simple o cruzado.

La deconvolución permite calcular el hidrograma de una surgencia, una vez conocida la respuesta del acuífero a una lluvia unitaria, función que se denomina hidrograma unitario o respuesta impulsional. El tiempo que una lluvia unitaria mantiene el caudal de la surgencia con valores no nulos constituye la memoria del sistema. Cuanto mayor es la memoria del sistema, mayor es su poder regulador, especialmente cuando el acuífero tiene reservas elevadas, es decir, gran volumen de agua almacenado bajo la cota de la surgencia.

De acuerdo con esos datos, los acuíferos kársticos de respuesta impulsional aguda y escasa memoria nos hablan de un flujo muy rápido dentro del acuífero y de bajo interés para su explotación mediante sondeos. Tenemos un ejemplo claro en el karst de Aliou, en el Pirineo francés, como han demostrado Mangin y el autor. En el extremo opuesto, acuíferos con respuesta impulsional muy leve y elevada memoria podrían considerarse equivalentes a un acuífero de porosidad intergranular; el Torcal de Antequera sería un ejemplo típico, aunque existen muchos otros.

Las evoluciones temporales de parámetros fisicoquímicos de las aguas (conductividad eléctrica, temperatura, biocarbonatos, calcio, magnesio, etc.) y los datos biológicos (microorganismos presentes, evolución temporal del número de individuos de cada especie,

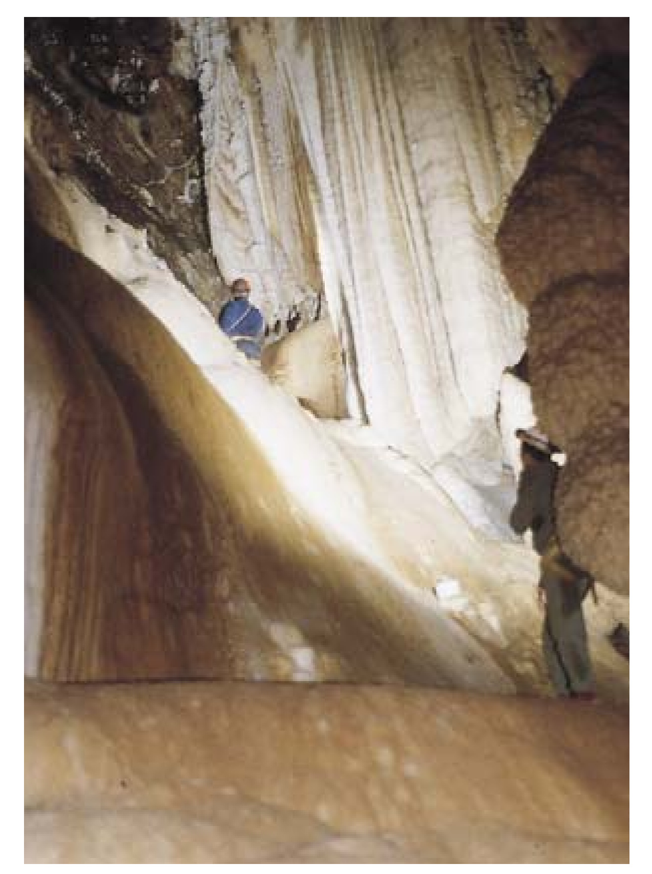


6. MUCHOS ACUIFEROS KARSTICOS —especialmente del área mediterránea— pueden simularse mediante modelos normalmente empleados en los acuíferos de porosidad intergranular con resultados satisfactorios; además de la piezometría en diversos nudos, se puede utilizar como criterio de ajuste la evolución temporal del caudal de las surgencias (ejemplo de Sierra Grossa, Valencia). El gráfico central representa la distribución espacial de los valores del coeficiente de almacenamiento (%); los gráficos laterales representan la evolución temporal del nivel piezométrico en siete pozos de observación a la que se superpone la evolución obtenida por simulación (*líneas discontinuas*).

etc.) han servido también para tratar de identificar el funcionamiento de los acuíferos kársticos.

Asimismo, en los sondeos mecánicos podemos calcular los caudales específicos y deducir la evolución espacial y temporal de los niveles piezométricos. Este conocimiento permite determinar muchas propiedades del flujo en los acuíferos kársticos (gradientes hidráulicos, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, difusividad hidráulica y otros). Se aprovechan también los sondeos para inyectar los trazadores.

Mediante la primera caracterización del acuífero kárstico, obtenida del estudio de los hidrogramas, se pueden plantear diferentes tipos de modelos matemáticos de simulación que van desde el tipo de caja negra a los más refinados en diferencias o elementos finitos en dos o tres dimensiones, uno de cuyos pioneros fue Kiraly. Las evoluciones piezométricas y los hidrogramas de las surgencias se pueden emplear como criterio de ajuste del modelo, al igual que sucede con los acuíferos detríticos.



7. LAS GRANDES CAVIDADES KARSTICAS raramente constituyen un porcentaje significativo de la porosidad eficaz dentro de un acuífero kárstico, pues se suelen desarrollar por encima del nivel piezométrico. En cualquier caso, la belleza de las formas que se ocultan en estas cuevas es bien notoria. (Cueva de las Maravillas en Aracena. Foto de W. Martín Rosales.)

Los acuíferos muy karstificados, de circulación rápida a través de conductos preferentes, caudales de base escasos y notables crecidas, deben simularse mediante modelos que reproduzcan grandes cambios en cortos espacios. Se trata, normalmente, de modelos en elementos finitos que permiten reproducir conductos altamente transmisivos, embutidos en una matriz de transmisividad, de cinco a diez órdenes de magnitud menor. Todo modelo constituye una simplificación de la realidad, que dispone de una serie de criterios para acrisolar la calidad de la simulación; en este caso, el criterio de ajuste es la comparación entre el caudal medido y el obtenido por simulación.

Cuando el acuífero presenta una memoria elevada, crecidas moderadas y caudales de base grandes, puede simularse mediante modelos de diferencias finitas, que parten de la discretización en celdillas del área de trabajo. Para cada nudo se estima el valor de la transmisividad (o de la permeabilidad y el espesor saturado, cuyo producto representa precisamente la transmisividad), el coeficiente de almacenamiento y el nivel piezométrico al comienzo de la simulación. Para cada celdilla hay que conocer también la infiltración de la lluvia en cada paso de tiempo (día o mes), los volúmenes bombeados, las relaciones río-acuífero y la naturaleza hidrodinámica de los límites. Mediante algoritmos adecuados el ordenador resuelve las ecuaciones que permiten calcular las variaciones espaciales y temporales de los niveles de agua, los caudales de las surgencias y otros parámetros.

Una vez ajustado el modelo, se puede pasar a la fase de explotación, donde se simulan la respuesta del acuífero ante determinados bombeos, la ausencia de recarga en tiempo de sequía y otras situaciones. Así se procedió con el acuífero de Sierra Grossa, de Valencia.

España tiene gran variedad de acuíferos kársticos que pueden cubrir la gama que va desde el asimilable al medio de porosidad intergranular hasta el kárstico en el sentido más estricto, es decir, un amplio conducto que arroja grandes caudales inmediatamente que ocurre la lluvia y que se agota a los pocos días. Una muestra de este último tipo podría ser el de los yesos triásicos de Vallada, en Valencia.

La peculiaridad que presenta España con respecto a muchos otros países, ocupados también por abundantes materiales carbonatados, es que la creciente escasez de agua ha obligado a explotar numerosos acuíferos kársticos. En numerosas áreas se han explotado acuíferos con caudales muy superiores a los de alimentación, provocándose un descenso continuado de los niveles piezométricos que ha superado los 350 metros. Algunos sectores de estos acuíferos han llegado a ser físicamente vaciados (el nivel ha quedado por debajo del sustrato impermeable en el extremo SE del acuífero de Crevillente, por ejemplo). Muchos de estos acuíferos sobreexplotados se sitúan a lo largo del borde mediterráneo. En algún caso, como sucede en el acuífero de la Sierra del Cid, la disminución de los bombeos está favoreciendo la recuperación del nivel piezométrico; de no haberse comenzado a explotar de nuevo, hubiera permitido la observación del llenado completo del acuífero y, posiblemente, la reaparición de las surgencias que en su tiempo lo drenaban.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BASIC AND APPLIED HYDROGEOLOGICAL RESEARCH IN FRENCH KARSTIC AREAS, Dirigido por N. Crampon y M. Bakalowicz, Action Costs-65, 1994.

RELATIVE IMPORTANCE OF BASEFLOW AND QUICKFLOW FROM HYDROGRAPHS OF KARST SPRINT. A. Padilla, A. Pulido Bosch y A. Mangin, en *Ground Water*, vol. 32 n.º 2, páginas 267-277, 1994.

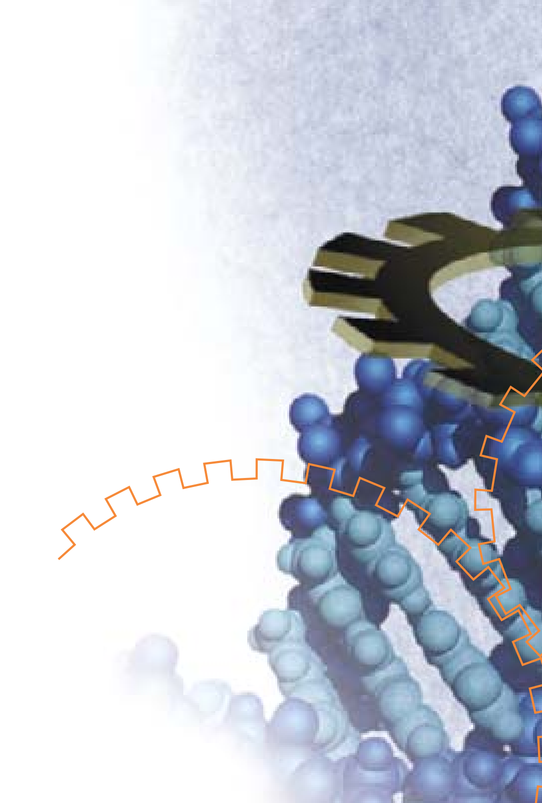
STUDY OF HYDROGRAMS OF KARSTIC AQUIFERS BY MEAN OF CORRELATION AND SPECTRAL CROSS ANALYSIS. A. Padilla y A. Pulido Bosch, en *Journal of Hydrology*, vol. 168, páginas 73-89.

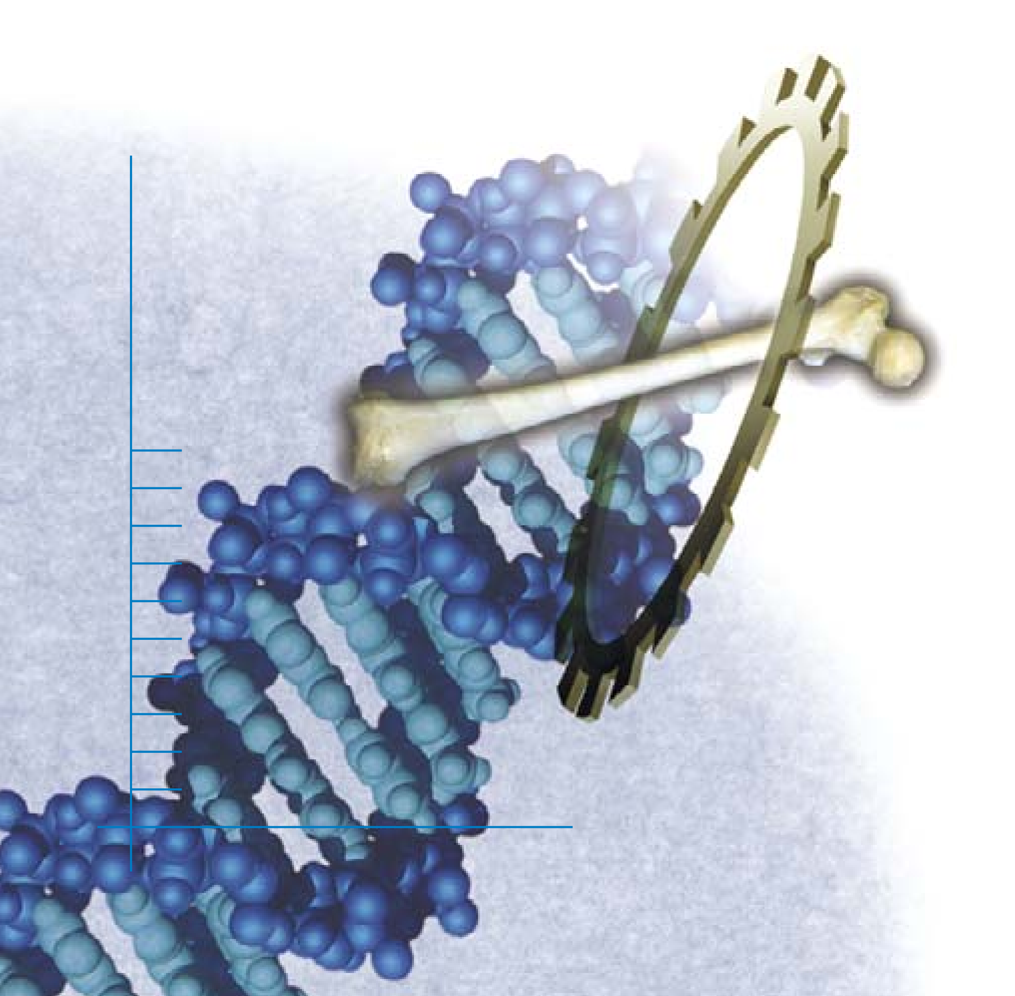
¿Tiene sentido la vida fuera de sí misma?

Los seres humanos siempre se han preguntado por el sentido de la vida. En opinión del autor, la vida no tiene otro significado que el de perpetuar la supervivencia del ADN

Richard Dawkins

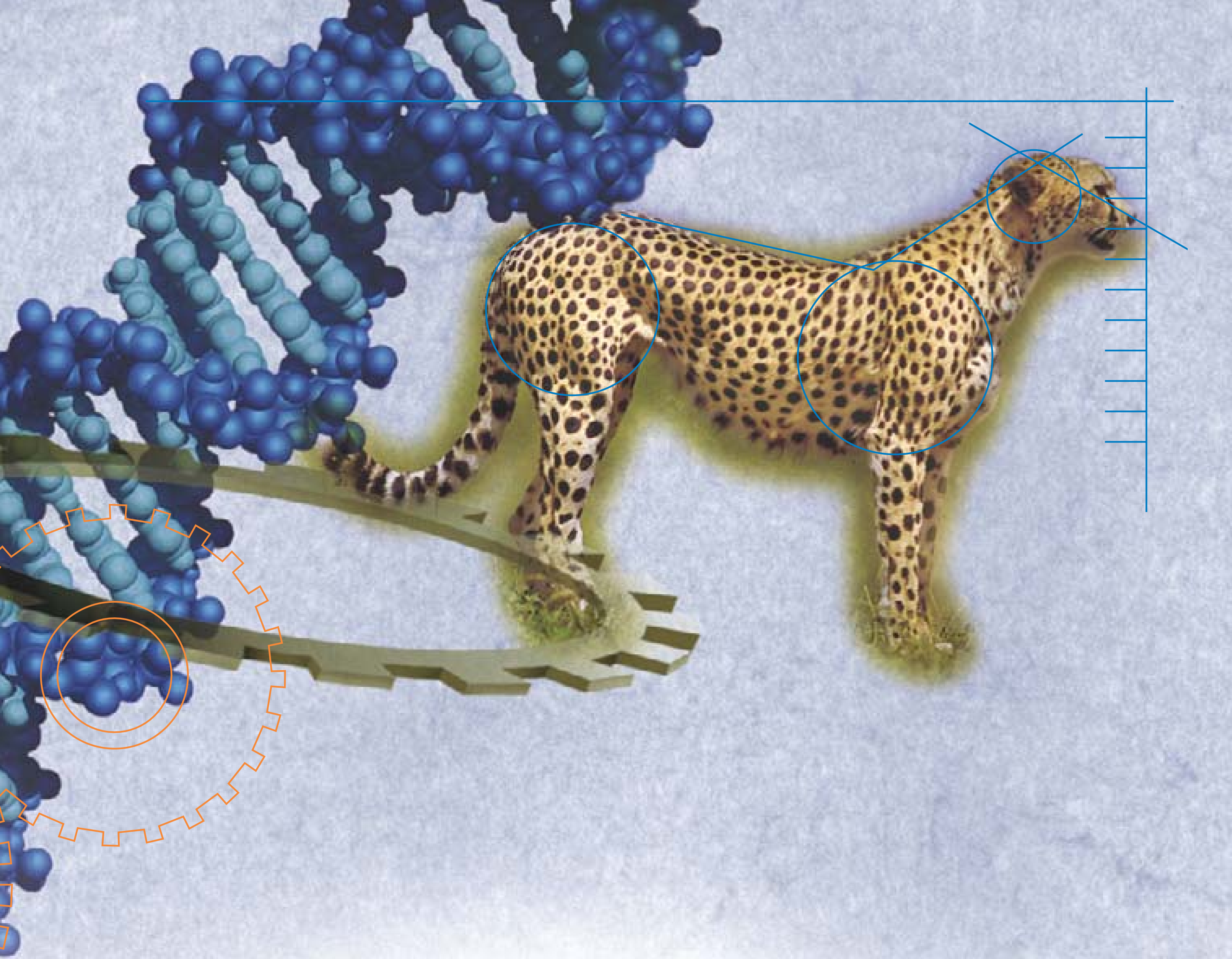
En sus numerosos libros sobre la evolución y la selección natural, Richard Dawkins analiza los temas desde lo que ha denominado "el punto de vista del gen" y no desde la perspectiva de los organismos individuales (como hizo Charles Darwin). Los genes de los seres vivos actuales son, afirma, los genes "egoístas" que se aseguraron su propia supervivencia dotando a sus huéspedes —que Dawkins denomina "máquinas de supervivencia"— de una longevidad lo suficientemente prolongada como para llegar a reproducirse.





"No me puedo convencer", escribía Charles Darwin, "de que un Dios benefactor y omnipotente hubiera creado intencionalmente los icneumónidos con el deseo expreso de que se alimentaran dentro de los cuerpos de las orugas". Los hábitos macabros de los icneumónidos los comparten otros grupos de avispas, como las avispas excavadoras estudiadas por el naturalista francés Jean Henri Fabre.

Fabre escribía que antes de poner su huevo en la oruga (en el saltamontes o en la abeja), la hembra de avispa excavadora hinca cuidadosamente su aguijón en cada ganglio del sistema nervioso central de la presa para inmovilizar al animal sin matarlo. De ese modo, la carne permanece fresca para la larva en desarrollo. No se sabe si la parálisis actúa como un anestésico general o si, a la manera del curare, lo único que hace es impedir todo movimiento de la víctima. Si ocurre esto último, la presa puede ser consciente de que se la están comiendo viva desde dentro sin poder mover un solo músculo ni



1. “MAQUINAS DE SUPERVIVENCIA”, como el autor denomina a los seres vivos, construidas por la selección natural para la propagación del ADN. El guepardo constituye uno de los ejemplos más espectaculares.

hacer nada al respecto. Esto suena salvajemente cruel, pero, como veremos, la naturaleza no es cruel, sino indiferentemente despiadada. En ello estriba una de las lecciones más duras que los seres humanos tienen que aprender. No podemos aceptar que las cosas no sean ni buenas ni malas, ni crueles ni benévolas, sino simplemente brutales: indiferentes a todo sufrimiento, carentes de sentido.

Los seres humanos tenemos el sentido o finalidad de las cosas en el cerebro. Nos es muy difícil contemplar cualquier cosa sin preguntarnos su “para qué”, cuál es su razón de ser, la finalidad subyacente. El deseo de ver intenciones por doquier es natural en un animal que vive rodeado de máquinas, obras de arte, herramientas y otros objetos construidos —un animal, además, cuyos pensamientos conscientes se ven dominados por sus propios objetivos y propósitos.

Aunque un automóvil, un abrelatas, un destornillador y un tenedor garantizan legítimamente una respuesta al “¿para qué sirve?”, el mero hecho de que sea posible plantearse una pregunta no la legitima como tal. Hay muchas cosas de las que se puede uno preguntar “¿cuál es su temperatura?” o “¿de qué color es?”, pero no se pueden hacer preguntas acerca de la temperatura o el color de, digamos, los celos o la oración. Igualmente, puede uno preguntar con toda razón el porqué de los guardabarros de una bicicleta o de la presa de Kariba, pero al menos no se tiene derecho a suponer que esa pregunta merece una respuesta cuando se formula acerca de una roca, una desgracia, el monte Everest o el universo. Hay preguntas que simplemente no proceden, por mucho que se deseen plantear.

Los seres vivos están situados entre los limpiaparabrisas y los abrelatas por un lado, y las rocas y el universo por otro. Los seres vivos y sus órganos son objetos que, a diferencia de las rocas, parecen estar llenos de sentido. De un modo notorio, la finalidad aparente de los cuerpos vivos domina todavía en el movimiento radical norteamericano de los “creacionistas científicos”, que defiende el “argumento del diseño”, porque “no hay reloj sin relojero”.

El proceso verdadero que ha identificado la aparición de alas, ojos, picos, instintos para anidar y todo lo que concierne a los seres vivos con el espejismo de un diseño intencional se comprende hoy bien. Es la selección natural darwiniana. Darwin se dio cuenta de que los organismos vivos actuales existen porque sus antepasados tenían características que les permitían prosperar a ellos y a su descendencia, mientras que los individuos menos eficaces perecían dejando tras de sí pocos descendientes o ninguno. Sorprendentemente nuestra comprensión de la evolución es muy reciente, sólo hace siglo y medio. Antes de Darwin, incluso la gente que ya había dejado de preguntarse el porqué de las rocas, ríos y eclipses







todavía aceptaban implícitamente que esa pregunta era legítima cuando se refería a los seres vivos. Actualmente sólo los analfabetos científicos se plantean esa pregunta. Pero ese "sólo" encubre la increíble verdad de que nos estamos refiriendo todavía a la mayor parte de la población mundial.

La construcción de un guepardo

Darwin supuso que la selección natural favorecía a los individuos mejor dotados para sobrevivir y reproducirse. Lo que equivale a decir que la selección natural favorece a aquellos genes que se replican durante muchas generaciones. Aunque las dos expresiones son equiparables, el "punto de vista del gen" presenta ciertas ventajas que se comprenden si traemos a colación el concepto de ingeniería inversa y la noción de función de utilidad. La ingeniería inversa responde a la siguiente forma de razonamiento: supóngase el lector que él es un ingeniero que se encuentra con un objeto artificial e ignora de qué se trata. Piensa que el objeto en cuestión se ha construido con algún fin. Procede entonces a desmontarlo y analizarlo para ver qué utilidad se le puede atribuir: "Si yo hubiera querido hacer un instrumento para realizar una función determinada, ¿lo habría hecho de esta manera? ¿O dicho objeto se explica mejor suponiendo que es un mecanismo para hacer esto o lo otro?"

La regla de cálculo, hasta hace poco imprescindible para la profesión de ingeniero, es tan obsoleta en la era electrónica como si se tratara de una reliquia de la Edad del Bronce. Un arqueólogo del futuro que encontrara una regla de cálculo y se preguntara para qué sirve, podría notar que no vendría mal para trazar líneas rectas o para untar de mantequilla el pan. Pero un simple borde recto o un cuchillo de untar mantequilla no precisaría de una parte deslizante en el centro. Por añadidura, las precisas escalas logarítmicas están dispuestas demasiado meticulosamente como para ser algo accidental. El arqueólogo pensaría que en un período anterior al de las calculadoras electrónicas, esto sería un aparato ingenioso para multiplicar y dividir con rapidez. El misterio de la regla de cálculo se resolvería mediante la ingeniería inversa, asumiendo que se hizo mediante un planteamiento inteligente y económico.

La "función de utilidad" es un término habitual entre los economistas. Significa "aquello que se maximiza". Los planificadores económicos y los ingenieros sociales se parecen a los arquitectos y a los ingenieros propiamente dichos en que se plantean la optimización de algo. Los utilitaristas tienen como meta "la mayor felicidad para el mayor número". Otros, supuestamente, aumentan su propia felicidad a expensas del bien común. Si se aplica la ingeniería inversa para explicar el comportamiento del gobierno de un país, se puede concluir que lo que se está optimizando es el empleo y el bienestar general. Para otro país, la función de utilidad puede resultar ser la maximización del poder continuado de un presidente, o del patrimonio de una determinada familia en el gobierno, o del tamaño del harén del sultán, o de la estabilidad en el Oriente Medio, o de las condiciones de la fijación del precio del crudo. Es decir, puede uno figurarse más de una función de utilidad. No está siempre claro lo que se pretende conseguir en el ámbito individual, empresarial o estatal.

Volvamos a los seres vivos y tratemos de descubrir su función de utilidad. Puede haber muchas, pero al final resulta que todas se reducen a una. Una buena manera de teatralizar la tarea es suponer que los seres vivos han sido construidos por una deidad ingeniera e intentar descubrir, por ingeniería inversa, qué es lo que intentó maximizar: la función de utilidad de esa deidad.

Los guepardos tienen toda la pinta de haber sido diseñados para algo, y debería ser suficientemente sencillo aplicar la ingeniería inversa y calcular su función de utilidad. Parecen estar bien diseñados para matar gacelas. Los dientes, garras, ojos, nariz, músculos de las patas, espinazo y cerebro de un guepardo son precisamente lo que esperaríamos si la intención de la deidad al diseñar los guepardos fuera maximizar la mortandad de las gacelas. Si por el contrario aplicamos la ingeniería inversa a una gacela,





2. LA DIVERSIDAD DE LA VIDA refleja las técnicas innovadoras que utiliza el ADN para maximizar su supervivencia. Por ejemplo, los músculos de la pata del guepardo le capacitan para cazar gacelas; pero las gacelas están bien equipadas para burlar a los guepardos. En esta pelea de vida y muerte, ambos animales luchan para garantizar su supervivencia y la de sus ADN. Las avispas parásitas buscan la maximización de la supervivencia de sus ADN depredando orugas: una avispa hembra deposita un huevo en una oruga paralizada por su aguijón; al eclosionar, la larva se come a la oruga viva. Las características físicas utilizadas en los rituales copulatorios responden a especializaciones que están a la par con las empleadas en la caza. Numerosas aves, como el faisán del Himalaya, y peces, como los hemúlidos orientales, despliegan un colorido caleidoscópico para atraer a sus parejas y asegurar la reproducción del ADN. Las plantas también compiten entre sí para su reproducción.



encontraremos asimismo una manifestación aplastante de un diseño para precisamente la finalidad opuesta: la supervivencia de las gacelas a costa de la hambruna de los guepardos. Es como si los guepardos hubieran sido diseñados por una deidad y las gacelas por otra deidad contraria. Pero si se tratara de una sola, ¿quién hizo el tigre y el cordero, el guepardo y la gacela? ¿A qué jugaba? ¿Se trata de un deidad sádica que se divierte con espectáculos donde corre la sangre? ¿Está tratando de impedir la superpoblación de los mamíferos en Africa? Estas son todas funciones de utilidad que podían ser verdad. De hecho, naturalmente, todas son completamente falsas.

La verdadera función de utilidad de la vida, aquella que se maximiza en el mundo natural, es la supervivencia del ADN. Pero el ADN no flota libre por ahí. Se halla encerrado en cuerpos vivos, y ha de emplear todos los resortes de poder que tiene a su disposición. Las secuencias genéticas que se sitúan en los cuerpos de los guepardos maximizan su supervivencia utilizando esos cuerpos para matar gacelas. Las secuencias que se encuentran en los cuerpos de las gacelas aumentan sus posibilidades de supervivencia apoyando una finalidad opuesta. Pero la misma función de utilidad —la supervivencia del ADN— explica la “intención” tanto en el guepardo como en la gacela.

Una vez admitido, este principio explica un conjunto de fenómenos que de otra manera son desconcertantes —por ejemplo, los esfuerzos tan costosos en energía y a menudo cómicos de los machos para atraer a las hembras, inclusive su inversión en “atractivo físico”. Los rituales copulatorios recuerdan en ocasiones la elección de Miss Mundo, pero con los machos desfilando por la pasarela (lo que afortunadamente ya no está de moda). Esta analogía se observa con plena nitidez en ciertas aves como el lagópodo común o el combatiente en las que los machos crean un lek, acotan un terreno, para exhibirse delante de las hembras. Estas visitan el recinto, el lek, y observan los despliegues ostentatorios de un determinado número de machos antes de elegir uno y copular con él. Los machos de las especies que crean lek a menudo poseen adornos extraños que exhiben con inclinaciones y reverencias igualmente notables. Los vocablos “extraño” y “notable” reflejan, por supuesto, juicios de valor. Seguramente, cuando el gallo lira actúa en el lek danzando y resoplando o acompañándose de expresiones sonoras secas, a las hembras de su propia especie no les parece extraño, y esto es todo lo que importa. En algunos casos, la idea de belleza de las hembras coincide con la nuestra, y el resultado es un pavo real o un ave del paraíso.

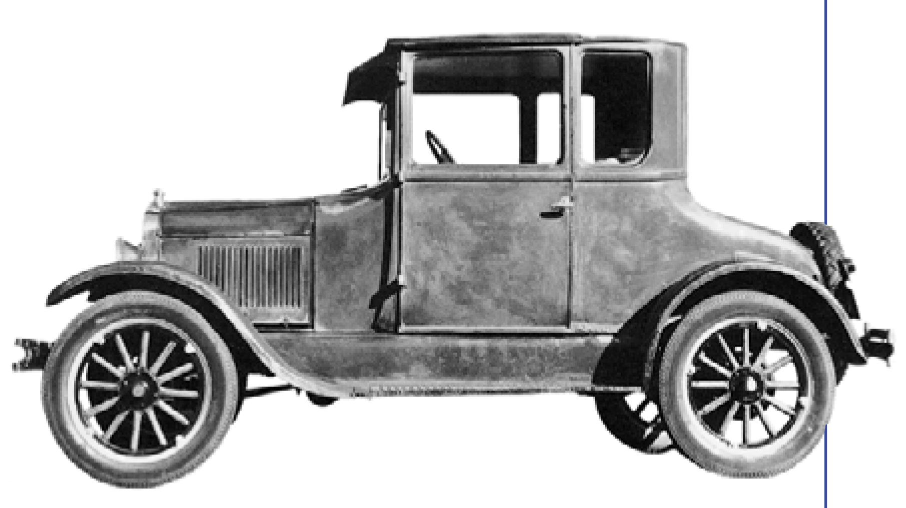
La función de la belleza

Los cantos del ruiseñor, las colas de los faisanes, las ráfagas de luz de las luciérnagas y las escamas irisadas de los peces que habitan en los arrecifes tropicales son, todos, caracteres que maximizan la belleza estética, que no existe, a no ser por casualidad, para deleite del ser humano. Si disfrutamos del espectáculo eso es un beneficio añadido, un efecto secundario. Los genes que hacen que los machos les resulten atractivos a las hembras automáticamente se ven traspasados a las generaciones siguientes. Existe sólo una función de utilidad que tiene sentido para esas bellezas: la cantidad que se optimiza eficazmente en cada hendedura del mundo viviente es, en todos los casos, la supervivencia del ADN responsable de la característica que se pretende explicar.

Esta fuerza también da cuenta de ciertas exageraciones misteriosas. Por ejemplo, los pavos reales están recargados con adornos tan pesados y agobiantes que obstacularizarían seriamente sus esfuerzos para hacer una tarea útil —si se sintieran inclinados a ello, lo que, en general, no suele ser el caso. Los machos de las aves canoras emplean peligrosamente su tiempo y energía en el canto. Y peligrosamente, no sólo porque así se atrae a los depredadores, sino también porque se gasta energía y tiempo que podrían emplearse en reponer las fuerzas. Un especialista en la biología del reyezuelo afirmaba que uno de sus machos silvestres cantó literalmente hasta que cayó muerto. Cualquier función de utilidad que se tomara en serio el bienestar a largo

El gran igualador

Para maximizar la supervivencia del ADN, los organismos pluricelulares dedican poca energía a la supervivencia indefinida de los distintos órganos. Los constructores de automóviles hacen lo mismo. El psicólogo darwinista Nicholas Humphrey estudió, durante su estancia en Cambridge, esa analogía en particular. Humphrey, en su libro *Consciousness Regained: Chapters in the Development of Mind* (*La conciencia recuperada: capítulos del desarrollo de la mente*), supuso que Henry Ford, personaje mítico de la eficiencia industrial, una vez



EL MODELO T no se diseñó para que funcionara siempre, por lo que habría sido estúpido malgastar medios en la manufactura de piezas indestructibles.

> ...encargó un sondeo en los cementerios de automóviles de América para averiguar si existían partes del modelo T Ford que se mantuvieran intactas. Los informes de sus inspectores incluían todo tipo de piezas inutilizables: ejes, frenos, pistones —todas acababan inservibles. Pero una notable excepción llamó su atención: a los *pernos* pivotantes de los vehículos para el desguace les seguían quedando todavía años de vida. Con una lógica aplastante Ford concluyó que los pernos pivotantes del modelo T eran demasiado buenos y dio la orden de que en adelante se fabricaran de una calidad inferior.

El lector, como yo, puede que no sepa exactamente lo que son los pernos pivotantes, pero eso no importa. Es una parte necesaria del motor del automóvil, y la supuesta decisión implacable de Ford era, de hecho, completamente lógica. La alternativa habría sido mejorar la calidad de las otras partes del auto para igualar la de los pernos pivotantes. Pero entonces ya no estaría fabricando el modelo T, sino un Rolls-Royce, y ésa no era su intención. Un Rolls-Royce es todo un vehículo, como lo es el modelo T —pero el precio es diferente. La idea es la de ajustarse al tipo de calidades del Rolls-Royce o del modelo T. Si se construye un auto híbrido con unas componentes de la calidad del modelo T y con otras de la calidad del Rolls-Royce, se está obteniendo un vehículo peor que los dos originales puesto que el auto no servirá para nada cuando se desgaste la parte de calidad inferior, y el dinero empleado en la manufactura de las partes de calidad superior que nunca se van a desgastar es dinero tirado.

La lección de Ford reviste todavía mayor interés cuando se aplica a los seres vivos. Las partes del auto pueden reemplazarse, dentro de ciertos límites, por piezas de recambio. Los monos y los gibones viven en las copas de los árboles y existe siempre el riesgo de que se caigan y se rompan algún hueso. Supongamos que encargamos un sondeo de cuerpos de gibones para contabilizar la frecuencia de rotura de los huesos más importantes del cuerpo. Supongamos que esta frecuencia es la misma para todos los huesos, menos para uno: el peroné (que es el hueso de la pantorrilla colocado paralelamente a la tibia) que nunca ha aparecido roto en el cuerpo de ningún gibón caído. Henry Ford no dudaría en dar la orden de rediseñar un peroné de inferior calidad, y eso es exactamente lo que también hace la selección natural. Individuos mutantes con un peroné de inferior calidad se desarrollan de tal modo, que parte del preciado calcio del peroné se utiliza para reforzar otros huesos del cuerpo y se alcanza así con el tiempo la situación ideal de que cada hueso tenga la misma probabilidad de romperse. O bien en dichos individuos ese calcio ahorrado se podría emplear en producir más leche y así dar de mamar a más crías. Se puede, pues, recortar sin problemas la parte ósea del peroné, por lo menos hasta que su probabilidad de rotura sea tan alta como la del siguiente hueso que le suceda en resistencia. La alternativa —la "solución del Rolls-Royce" de mejorar la calidad de todos los demás huesos hasta alcanzar la del peroné— es más difícil de conseguir.

EL GIBON también fue diseñado —por la selección natural— con partes que no fueran indestructibles.

La selección natural favorece una igualación de la calidad en ambos sentidos (hacia menos y hacia más calidad) hasta alcanzarse un equilibrio entre todas las partes del cuerpo.

Contemplados desde la perspectiva de la selección natural, lo mismo el envejecimiento que la muerte por decrepitud resultan ser las consecuencias fatales de esa acción equilibrante. Descendemos de un largo linaje de antepasados jóvenes cuyos genes aseguran vitalidad en los años reproductivos, pero no reunieron provisiones para resistir pasada esa etapa. Un joven pletórico de salud es crucial para asegurar la supervivencia del ADN. Pero una vejez pletórica de salud puede ser un lujo análogo a los pernos principales de superior calidad del modelo T.

—R. D.

plazo de la especie, o incluso la supervivencia individual de un macho concreto, rebajaría la dosis de canto, de cortejo, de lucha entre machos.

Pero si se considera a la selección natural también desde la perspectiva de los genes en vez de recluirse en la supervivencia y reproducción de los individuos, ese comportamiento halla fácil explicación. Porque lo que realmente se está maximizando en los reyezuelos canoros es la supervivencia del ADN, nada puede parar la expansión de un ADN que no tenga otro efecto beneficioso que hacer a los machos atractivos a las hembras. Si determinados genes dotan a los machos de cualidades que las hembras de la especie encuentran deseables, esos genes, se quiera o no, sobrevivirán, incluso aunque circunstancialmente entrañen riesgos para la supervivencia de algunos individuos.

Los seres humanos tendemos a suponer que "bienestar" significa bienestar del grupo, que "bien" se refiere al bien de la sociedad, al bienestar de la especie o incluso del ecosistema. La función de utilidad, derivada de la contemplación de los engranajes de la selección natural, resulta incompatible con esas visiones utópicas. Claramente, existen situaciones en las que los genes pueden maximizar su bienestar egoísta programando para el organismo una cooperación no egoísta que implique incluso un sacrificio individual. Pero el bienestar del grupo es siempre una consecuencia fortuita y no un efecto principal.

El darse cuenta de que los genes son egoístas también explica los excesos que existen en el reino vegetal. ¿Por qué son tan altos los árboles del bosque? Simplemente, para superar a los árboles rivales. Una función de utilidad "solidaria" haría que todos fueran bajos. Entonces todos obtendrían exactamente la misma cantidad de luz solar con mucho menos gasto en troncos anchos y contrafuertes enormes de apoyo. Pero si todos fueran bajos, la selección natural no podría favorecer la variante que creciera un poco más. Elevada ésta, el resto la seguiría. Nada puede impedir que toda esa dinámica se dispare hasta que todos los árboles sean ridícula y despilfarradoramente altos. Pero es un despilfarro ridículo sólo desde el punto de vista de un planificador racional que pretende maximizar un rendimiento en vez de la supervivencia del ADN.

Las analogías caseras abundan. En un cocktail todo el mundo alza la voz hasta quedarse ronco. La razón es que todos intentan hacerse oír. Si los reunidos se pusieran de acuerdo en hablar bajo, se oirían exactamente igual, alzando menos la voz y gastando menos energía. Pero esos acuerdos nunca funcionan a no ser que se disponga de vigilantes al efecto. Siempre hay alguien que lo estropea todo egoístamente hablando un poco más alto, y, uno a uno, todos le siguen. Unicamente se alcanza un equilibrio estable cuando todo el mundo grita todo lo que puede, y esto implica un volumen mucho más alto que lo necesario desde un punto de vista "racional". Una y otra vez, una contención cooperativa se va al traste por su propia inestabilidad interna. La función de utilidad de la selección natural rara vez resulta en el mayor bien para el mayor número; antes bien, traiciona su origen en una lucha descontrolada por un beneficio egoísta.

Un universo de indiferencia

Retornando al pesimismo del principio, la maximización de la supervivencia del ADN no es una receta para la felicidad. Mientras el ADN se transmita, no importa quién o qué sale mal parado en la operación. A los genes no les importa el sufrimiento, porque no les importa nada.

Es mejor para los genes de la avispa de Darwin que la oruga siga viva, y así su carne continúe siendo fresca cuando se la coman, sin que les perturbe el sufrimiento que eso suponga. Si la naturaleza tuviera corazón, por lo menos haría posible la concesión mínima de que las orugas fueran anestesiadas antes de que se las comieran vivas por dentro. Pero la naturaleza ni es buena ni deja de serlo. No está ni contra el sufrimiento ni a favor. La naturaleza no se interesa por el sufrimiento en un sentido u otro, a no ser que influya en la supervivencia del ADN. Es fácil imaginarse un gen que, por ejemplo, tranquilice a la gacela cuando le van a dar un mordisco mortal. ¿Se vería favorecido un gen así por la selección natural? No, a no ser que el acto de tranquilizar a la gacela mejorara las posibilidades de que el gen se propagara a generaciones futuras. No es fácil imaginarse por qué esto debería ocurrir, y por tanto tenemos que pensar que las gacelas sufren un dolor y un miedo horribles cuando se las persigue hasta la extenuación, como finalmente sucede con muchas de ellas.

La cantidad total de sufrimiento por año en el mundo natural va mucho más allá de lo que se pueda suponer. Durante el minuto que tardo en escribir esta frase, miles de animales son pasto vivo de otros, muchos corren para salvar su vida, gimoteando de terror, a otros los están devorando en sus entrañas parásitos raspadores, miles de organismos de todo tipo se están muriendo de hambre, sed y enfermedades. Si llega en algún momento a haber abundancia de alimentos, este mismo hecho conducirá a un aumento de la población hasta que vuelva a establecerse el estado natural de falta de alimento y miseria.

En un universo de electrones y genes egoístas, fuerzas físicas ciegas y replicación genética, algunos lo van a pasar mal, otros van a tener más suerte, y por mucho que se busque no se encontrará ninguna explicación, ningún rastro de justicia. El universo que observamos tiene precisamente las propiedades esperables si en el fondo no hay diseño, ni intencionalidad, ni mal ni bien, nada excepto una indiferencia despiadada. Como decía aquel desgraciado poeta A. E. Housman:

Porque la naturaleza, sin corazón, necia naturaleza
Ni preocuparse quiere ni sabe

El ADN ni se preocupa ni sabe. El ADN es, sin más. Y nosotros bailamos al son de su música.

RICHARD DAWKINS nació en Kenia en 1941. Estudió en la Universidad de Oxford y realizó el doctorado en zoología bajo la dirección de Niko Tinbergen. Después de dos años de estancia en la Universidad de California en Berkeley, Dawkins regresó a Oxford, donde ahora ejerce como profesor de zoología.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EXTENDED PHENOTYPE: THE LONG REACH OF THE GENE. Richard Dawkins. Oxford University Press, 1989.

EVOLUTION. Mark Ridley. *Blackwell Scientific Publications*, 1993.

DARWIN'S DANGEROUS IDEA: EVOLUTION AND THE MEANING OF LIFE. Daniel C. Dennett. Simon & Schuster, 1995.

El descubrimiento de los rayos X

En 1895 Wilhelm Röntgen obtenía, por azar, las primeras imágenes de rayos X. Desde entonces no ha dejado de crecer el número de aplicaciones, de la medicina a la ingeniería

Graham Farmelo

Para que acudiese a cenar, su mujer tuvo que mandar varias veces a la criada al laboratorio. En la mesa, Wilhelm Conrad Röntgen, director del departamento de física de la Universidad de Würzburg, estuvo distraído, comió poco y habló menos. En cuanto terminó, volvió al trabajo. Era el 8 de noviembre de 1895, viernes. Llevaba meses investigando las características de los rayos catódicos, que otros identificarían después con los electrones.

Sabía que esos rayos, que en un tubo de vacío especial cargado con electricidad de alto voltaje se producían copiosamente, sólo atravesaban unos cuantos centímetros de aire. Por ello se quedó perplejo cuando aquella noche, antes de cenar, vio una imagen vacilante tan lejos del tubo que no podían haberla causado los rayos catódicos, aunque sólo aparecía cuando estaban presentes.

Pasó la noche absorto en el asunto. Ni siquiera advirtió que un viejo ayudante de laboratorio llamara a la puerta, entrara y saliera. Durmió y comió en el laboratorio durante días. (Tan preocupado estaba con el problema, que ignoró una regla fundamental de la experimentación: no empezó a tomar notas hasta casi una semana después.) Sólo al repetir muchas veces el experimento acabó por creer que la imagen que veía la había creado un nuevo tipo de rayo. Como ignoraba su naturaleza, los llamó rayos X, donde la equis se refería a que eran desconocidos.

Sólo habló de los rayos a su amigo más íntimo, el zoólogo de Würzburg Theodor H. Boveri. "He descubierto algo interesante", le dijo, "pero no sé si mis observaciones son correctas o no". Su esposa Bertha fue el primer testigo de los experimentos; el domingo antes de Navidad la invitó al laboratorio y le tomó una imagen que mostraba los huesos de su mano izquierda. Fue la primera fotografía de rayos X de una parte del cuerpo humano [*véase la figura de arriba a la izquierda en el recuadro*].

En la semana siguiente a las Navidades publicó un artículo breve, y en la primera del nuevo año los periódicos de todo el mundo fueron informando de su descubrimiento. Nunca antes un logro científico había causado tanta sensación en la prensa popular. A finales del siglo XIX hubo bastantes inventos verdaderamente notables, pero a la gente le fascinó en especial el hallazgo de Röntgen, que proporcionaba la manera de sondear el cuerpo humano sin tener que abrirlo.

Se cayó casi inmediatamente en la cuenta del potencial que tenían los rayos X para el diagnóstico. En un mes, los cirujanos europeos y de los Estados Unidos le daban ya múltiples usos. Quizá la más singular entre las primeras aplicaciones de los rayos fue el intento, descrito por el Colegio de Médicos y Cirujanos de la Ciudad de Nueva York, de "reflejar los diagramas anatómicos directamente en los cerebros de sus estudiantes, de forma que se produzca una impresión mucho más persistente que mediante los métodos ordinarios de aprendizaje de los detalles anatómicos". Pasarían unos veinte años antes de que se determinase la verdadera naturaleza de los rayos X. Pese a ello, y aun cuando varios científicos de la época lo consideraran más fruto de la suerte que del talento, el anuncio original de Röntgen resultó ser uno de los más celebres de la historia de la física.

GRAHAM FARMELO dirige la programación del Museo de la Ciencia de Londres, al que se incorporó en 1990. De 1977 a 1990 enseñó física en la Universidad a Distancia. Sus investigaciones se han centrado en la dispersión de las partículas subnucleares y, más recientemente, en el caos de sistemas cuánticos y de dispersión clásica.

Rayos catódicos

Aunque al final la celebridad le llegase como físico, Röntgen quiso en un principio ser ingeniero. Nació en 1845 en una acomodada familia mercantil de Lennep, un pueblecito del noroeste de Alemania. Pasó la mayor parte de su infancia y primera juventud en Holanda. A los veinte años se trasladó a Zurich, y tres años después se licenció en ingeniería por el Instituto Técnico Federal. Aunque no había seguido ningún curso experimental de física durante la carrera, decidió doctorarse en esa especialidad, en parte persuadido por su mentor, August E. E. Kundt, catedrático de física en el Instituto.

Tras recibir el doctorado en 1869, ocupó una serie de puestos de enseñanza en diversas universidades alemanas. En colaboración con Kundt, estudió cuidadosamente el comportamiento de la materia y fue, por ejemplo, el primero en mostrar (con un termómetro hecho por él mismo) que es más fácil calentar el aire húmedo que el seco. Otros aspectos de su trabajo respaldaron con fuerza la teoría unificada de la electricidad y el magnetismo formulada en la década de los setenta por el físico matemático escocés James Clerk Maxwell.

A los 43 años se le nombró catedrático de física y director del insti-

tuto de física de la Universidad de Würzburg, una pequeña y próspera ciudad bávara. En el segundo piso del instituto compartía con su esposa un amplio alojamiento, que incluía un estudio unido a uno de los dos laboratorios privados. Este nombramiento debió de resultarle sumamente placentero: 18 años atrás, la universidad no le permitió optar allí al puesto de catedrático porque no pudo presentar el *Abitur*, certificado que acreditaba que se habían completado los estudios de bachillerato.

Dedicó una buena cantidad de tiempo a conseguir del joven departamento de física de Würzburg más espacio para laboratorios, más personal y otros recursos; quería convertirlo en uno de los mejores de Alemania. Sus colegas sabían que era un trabajador ambicioso y meticuloso, extraordinariamente puesto al día en los últimos avances de todas las áreas de la física. Era sociable, pero a lo largo de toda su carrera de investigador apenas si cambió con otros colegas alguna frase de tipo profesional.

En junio de 1894 se puso a estudiar los rayos catódicos, por entonces un tema de moda en investigación. El físico alemán Eugen Goldstein, de la Universidad de Berlín, había dado nombre a esos rayos hacía 18 años. Goldstein y algunos otros dejaron establecido que los rayos catódicos portaban carga negativa y que se movían bastante más despacio que la luz. Pero seguía en pie un problema central: mientras la mayoría de los físicos británicos creía que esos rayos eran partículas, sus análogos alemanes pensaban que consistían en perturbaciones de cierto éter que lo impregnaba todo.

Seguramente nunca sabremos qué movió a Röntgen a poner su atención en los rayos catódicos. Sus cuadernos de notas indican que estaba comprobando los resultados obtenidos por dos físicos experimentales de la Universidad de Bonn, Heinrich R. Hertz, el descubridor de las radioondas, hacía poco fallecido, y su ayudante, Philipp E. A. Lenard. El trabajo de Röntgen se interrumpió en otoño, cuando le eligieron rector de la universidad, el puesto más alto que ocuparía. Algunos científicos se acomodan a los halagos que reporta el gobierno, pero Röntgen no era de esa madera. Para el otoño del año siguiente lo encontramos de nuevo en el laboratorio.

1. LA PRIMERA IMAGEN por rayos X de un cuerpo humano la hizo Ludwig Zehnder, ayudante de Röntgen, en agosto de 1896. Las fotografías son de las partes del cuerpo de varias personas. Las exposiciones duraban de cinco a quince minutos.

El día del descubrimiento

Quien visite hoy el despacho 119A de la Escuela Técnica de Würzburg no tardará en percibir la sensación de hallarse en una parte especial del edificio. En esa estancia de techo alto y seis metros cuadrados que mira al jardín botánico y la frondosa calle Pleicher Ring (llamada ahora Röntgen Ring), hizo el descubrimiento que asombraría al mundo. Aunque ese museo de una sala no exhibe el aparato que él empleó, rezuma historia. No maravilla que el personal de la escuela baje con reverencia la voz cuando introduce en el santuario a los visitantes.

La noche del 8 de noviembre de 1895, seguida por siete semanas de secreto, da lugar con creces a la fascinación y las cábalas. El propio Röntgen hizo mucho por alimentar este interés con su reserva y hermetismo característicos, sin que fuera su intención, y además porque nunca dio una descripción definitiva de lo que en realidad pasó. La que se ofrece aquí es, pues, una versión de los hechos, sacada de los comentarios de Röntgen que se conocen y de sus escasísimos escritos.

El equipo con el que estudió los rayos catódicos era de lo mejor de que se disponía por entonces. Prefería construir sus propios aparatos cuando era posible, pero la mayoría de los que usó en esos experimentos fueron suministrados y diseñados por expertos constructores de instrumentos. Para preparar su tubo de rayos catódicos sacaba el gas y el vapor con una bomba de vacío. En este procedimiento, que era habitual, se bombeaba el tubo durante tres o cuatro días para reducir la presión hasta dejarla por debajo de la milésima de la presión atmosférica usual. Gracias a esta presión tan baja los rayos catódicos, que así chocaban con moléculas de gas sólo raras veces, recorrían con libertad el tubo.

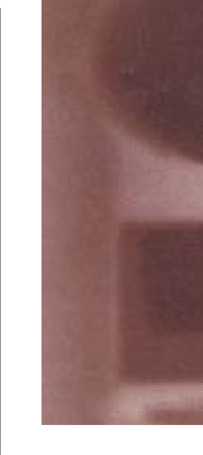
Una bobina de inducción, similar en sus principios al transformador que genera las chispas de alto voltaje en el motor

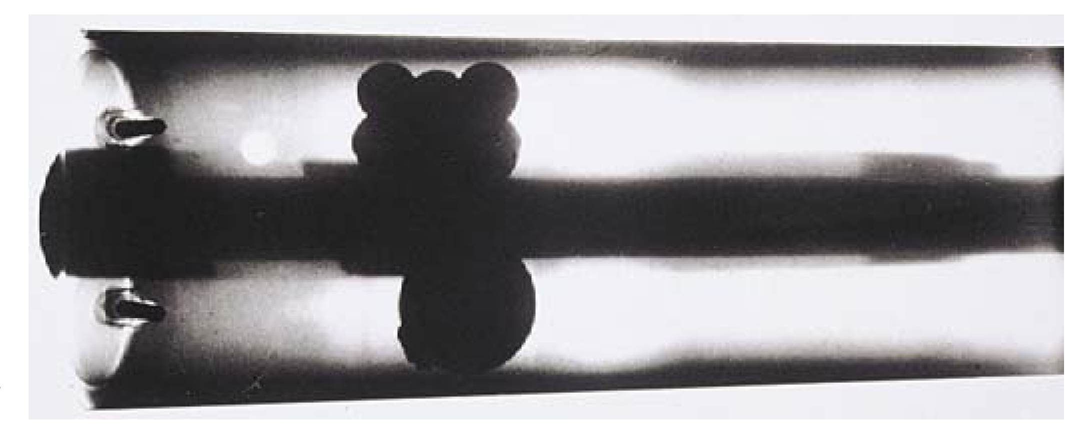
Aplicaciones de los rayos X

Röntgen inició tres aplicaciones fundamentales de la toma de imágenes con rayos X durante sus primeras investigaciones. En primer lugar, sacó una imagen por rayos X de una caja de pesas cerrada, hecha de madera, que mostró claramente lo que contenía, un presagio de los controles de seguridad conocidos por todos los que hayan viajado en avión (*arriba a la derecha*). Tomó también una imagen de rayos X de su escopeta de caza donde se le descubría un defecto interno (*abajo a la izquierda*). Ahora es común que se usen los rayos X en la fabricación para descubrir defectos estructurales ocultos en una variedad de objetos. Además, hizo una radiografía permanente de la mano izquierda de su esposa, la primera de una parte del cuerpo humano (*arriba a la izquierda*).



La primera fotografía por rayos X de una parte del cuerpo humano





La escopeta de caza de Röntgen

de un coche, aportaba la corriente eléctrica. El transformador de Röntgen tomaba 20 volts de unas baterías instaladas en el sótano del instituto y los convertía en pulsos sueltos de unos 35.000 volts cada uno. Cada segundo se generaban unos ocho pulsos, acompañado cada uno por un sonoro chasquido procedente de la descarga eléctrica entre los extremos de la bobina secundaria.

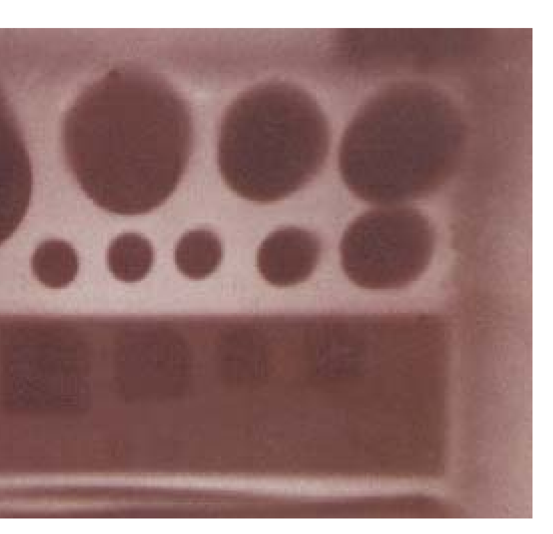
Trabajaba entonces solo, lo habitual en él. Sabía bien que los rayos catódicos hacían que una pantalla cubierta de platinocianuro de bario produjera fosforescencia de un color verde característico. Pero es probable que le fuese difícil discernir ese resplandor porque era parcialmente ciego al color. Oscureció, pues, la habitación y bloqueó toda la luz que venía de fuera, de la calle iluminada con farolas de gas. Cubrió el tubo de rayos catódicos con trozos de cartón negro, pegados de manera que no pudiese escapar del tubo luz visible.

En el laboratorio totalmente a oscuras, mientras oía los chasquidos, se percató de que un pequeño papel que había en su mesa de trabajo destellaba como si un solo rayo de luz diese en él. Vio que esa luz salía de una letra "A" que un estudiante había escrito en la hoja con solución de platinocianuro. Debió de quedarse atónito: los rayos catódicos no podían haber recorrido la distancia que había del tubo al papel y revelar lo que estaba escrito en él. Los experimentos posteriores indicaron que esa luz vacilante la causaba algo que se emitía desde el tubo y era más penetrante que los rayos catódicos.

"Por accidente", como él mismo decía, descubrió que un papel negro no era obstáculo para esa emanación. Luego comprobó que atravesaba un naipe. Un libro grueso, vio, arrojaba una nítida sombra en la pantalla, lo que indicaba que estaba observando un tipo de rayos que se movían en línea recta. Y cuando examinó en qué medida penetraban en los metales, se llevó quizá la mayor sorpresa de todas. Al poner un pedazo de plomo en el camino de los rayos, no vio sólo la oscura sombra del objeto, sino además otra más débil, con la forma de su pulgar y el otro dedo. Esa sombra encerraba a su vez otras, que perfilaban los huesos de la mano.

Röntgen elucidó las propiedades de los rayos X con un experimento clásico. Por medio de un imán que desviaba los rayos catódicos para que diesen en diferentes áreas del extremo del tubo de vacío, llegó a la conclusión —en cosa de unos minutos— de que los rayos X se emitían desde el punto donde los rayos catódicos golpeaban en la pared interior del tubo y no desde cualquier otro punto del circuito. Mostró también que las fuerzas magnéticas no afectaban a los rayos X; carecían, pues, de carga eléctrica.

A continuación, Röntgen determinó que, como los rayos catódicos,



***Radiografía de una caja de madera y fotografía óptica de la misma caja* (abajo)**



los rayos X podían velar una placa fotográfica. Colocó objetos entre la fuente de los rayos y la placa, y tomó fotografías permanentes de rayos X, explotando la diferente capacidad de cada material para transmitirlos. Al tomar esas fotografías se convirtió en el pionero de tres áreas fundamentales de la toma de imágenes con rayos X. En primer lugar, una fotografía de su caja cerrada de pesas, una caja de madera, mostró lo que contenía; presagiaba así su uso con fines de seguridad, como se hace en los controles de todos los aeropuertos.

En segundo lugar, una imagen de rayos X de su escopeta de caza descubrió un defecto en el metal del cañón: por primera vez se exponía un fallo estructural sin tener que destruir el objeto. Por último, y lo que más impresionó de todo, tomó una imagen permanente mediante rayos X de la mano izquierda de su mujer en la que se le veían los huesos y los anillos que llevaba. Para producirla, Bertha mantuvo su mano quieta contra la placa durante unos quince minutos. Recibió así una dosis de rayos X que sobrepasó peligrosamente los límites que los criterios modernos de salud y seguridad establecen. Estos son los riesgos que sin saberlo corren los pioneros.

Röntgen comparó con cuidado las propiedades de los rayos X y las de la luz visible. Unos y otra son eléctricamente neutros y pueden formar sombras nítidas, pero halló que los rayos X parecían diferir de la luz en divesos aspectos. No pudo ni reflejarlos ni refractarlos (es decir, no pudo cambiar su dirección al hacer que pasasen de un medio a otro atravesando, por ejemplo, un prisma de cristal). Además, no encontró indicios de que se los pudiese difractar (los rayos no se doblaban alrededor de los obstáculos que hubiese en su camino).

De todas formas, las similaridades entre los rayos X y la luz le llevaron a proponer que había alguna relación entre ellos. Según la teoría formulada por Maxwell en 1873, la luz es una onda electromagnética que se propaga por el éter, con las señales eléctrica y magnética vibrando perpendicularmente a la dirección de movimiento de la onda. Röntgen sugirió tentativamente que los rayos X eran vibraciones del éter que se producían en la misma dirección en que avanzaban los rayos. Esta conjetura —que resultó errónea— concluía su artículo *Sobre un nuevo tipo de rayos, comunicación preliminar*, una obra maestra de la física experimental y de la exposición concisa; a la Universidad de Würzburg se la siguen solicitando hoy.

Tres días después de las Navidades de 1895, le dio el manuscrito de diez páginas a la secretaria de la Sociedad de Medicina Física de Würzburg, con la petición inusual de que se publicase en seguida. El día de año nuevo, tras enviar por correo copias del manuscrito y fotografías a varios físicos europeos destacados, le comentó a su esposa: "Ahora viene lo gordo."

Las consecuencias inmediatas

"A los pocos días ya estaba harto. No podía ni reconocer mi propio trabajo en las informaciones", le escribió a un antiguo ayudante alrededor de un mes después de que corriese la noticia de su descubrimiento. Le disgustaron y perturbaron los pri-

2. WILHELM CONRAD RÖNTGEN fue un experimentador meticuloso y solitario que apenas si cambió alguna frase de tipo profesional con otros físicos. Su inesperado descubrimiento de los rayos X causó una gran sensación en la prensa mundial y atrajo sobre él una atención y una celebridad que enseguida rechazó.

meros artículos de los periódicos, para los que sus notables fotografías eran, de lejos, lo más importante de los experimentos. A él le interesaba muchísimo más descubrir tanto la verdadera naturaleza como las propiedades de los rayos X.

La primera información periodística salió el domingo 5 de enero, en la *Presse* de Viena, y para el 16 de enero la nueva había llegado al *New York Times*. Casi todos los científicos leyeron estas exposiciones antes de que se dispusiera de traducciones del artículo original, así que no es sorprendente que varios expertos no las creyeran. Entre los escépticos se contaba Lord Kelvin, de la Universidad de Glasgow, considerado entonces por muchos el mayor científico vivo. Kelvin creyó al principio que el anuncio era una trola (pronto cambió de opinión).

La asombrosa capacidad que tenían los rayos X de penetrar en la materia se convirtió en motivo de muchas viñetas, donde se traslucían las interpretaciones erróneas de la divulgación de los nuevos rayos. Cierta empresa de Londres anunciaba su "ropa interior a prueba de rayos X", y unos franceses entusiastas intentaron "fotografiar el alma". En Iowa, un granjero comunicó que había usado los nuevos rayos para transformar una pieza metálica de 13 centavos en oro por valor de 153 dólares.

Los ingenieros y los fotógrafos fueron en general más rápidos aún que los médicos en captar el potencial de los aparatos de rayos X. Como la revista norteamericana *Electrical Engineer* comentaba en marzo de 1896, "puede decirse con toda seguridad que no hay probablemente nadie que posea un tubo de vacío y una bobina de inducción y no haya intentado repetir los experimentos del profesor Röntgen". A finales del año funcionaban cientos de burdas máquinas de rayos X. Los primeros intentos de sacar radiografías fueron a tientas; quienes los llevaron a cabo sólo podían imaginarse cuál era la exposición necesaria para que las fotografías fuesen claras. Desde 1899 los médicos probaron los rayos para remediar el cáncer, la tuberculosis y varias inflamaciones. Su éxito fue dispar, y hubo pacientes y médicos que sufrieron serias quemaduras por la radiación.

Mientras tanto, Röntgen se esforzaba por continuar sus investigaciones en el papel desacostumbrado que le había tocado, el de celebridad internacional. No respondía la mayoría de las cartas que recibía y rechazó todas las invitaciones a dar conferencias excepto dos: ante la corte imperial de Berlín y ante el claustro y alumnos de Würzburg. Se le pidió que ofreciera una exhibición de su descubrimiento el 13 de enero ante el emperador Guillermo II, a quien admiraba por su política y su interés por la ciencia. Tras la triunfante exhibición, el emperador le concedió la orden prusiana de la corona (de segunda clase) e inmediatamente encargó a otros tres científicos que investigasen el potencial militar del descubrimiento. Röntgen estuvo al tanto de estos trabajos, pero ni contribuyó a ellos ni los estorbó.

A la conferencia de Würzburg asistieron también jefes militares y responsables locales. Con un discurso sereno y un fuerte acento holandés, presentó sus resultados y deleitó a su público preparando ante él una fotografía de rayos X de la mano de un amigo y colega, E. Albert von Kölliker, uno de los fundadores de la histología, quien pidió que se diesen tres hurras y propuso que en adelante los rayos se llamasen rayos Röntgen. Contra la voluntad del descubridor, enseguida se adoptó ese nombre en todos los países de lengua alemana, donde se sigue utilizándolo.

El primer Nobel

Pese a las indeseadas distracciones de la fama, concluyó dos artículos más sobre los rayos X, uno en marzo de 1896 y otro al año siguiente. En estos breves escritos, redactados en el mismo estilo conciso del primero, explicaba los efectos que se producían al exponer distintos materiales a los rayos X. Durante el resto de su vida, aunque siguió investigando sus propiedades, no escribió nada más sobre ellos.

Poco después del descubrimiento de los rayos X, Alfred Nobel bosquejó

3. ESTA MAQUINA CASERA es, se cree, el más viejo de los aparatos productores de imágenes por rayos X que aún subsisten. El médico inglés John Reynolds y su hijo, Russell, se pusieron a construirlo poco después de que leyesen la noticia del descubrimiento de Röntgen en el *London Standard* el 7 de enero de 1896. La bobina de inducción (*arriba, por el centro hacia la izquierda*) recibía la energía eléctrica de siete baterías de ácido crómico de un cuarto (*en el suelo, detrás*). Los Reynolds enrollaron la bobina a mano, lo que no fue una tarea pequeña: la bobina secundaria tenía unos 21 kilómetros de hilo. La salida de alto voltaje de la bobina se aplicaba al tubo de rayos X, que estaba fijado al soporte de caoba.

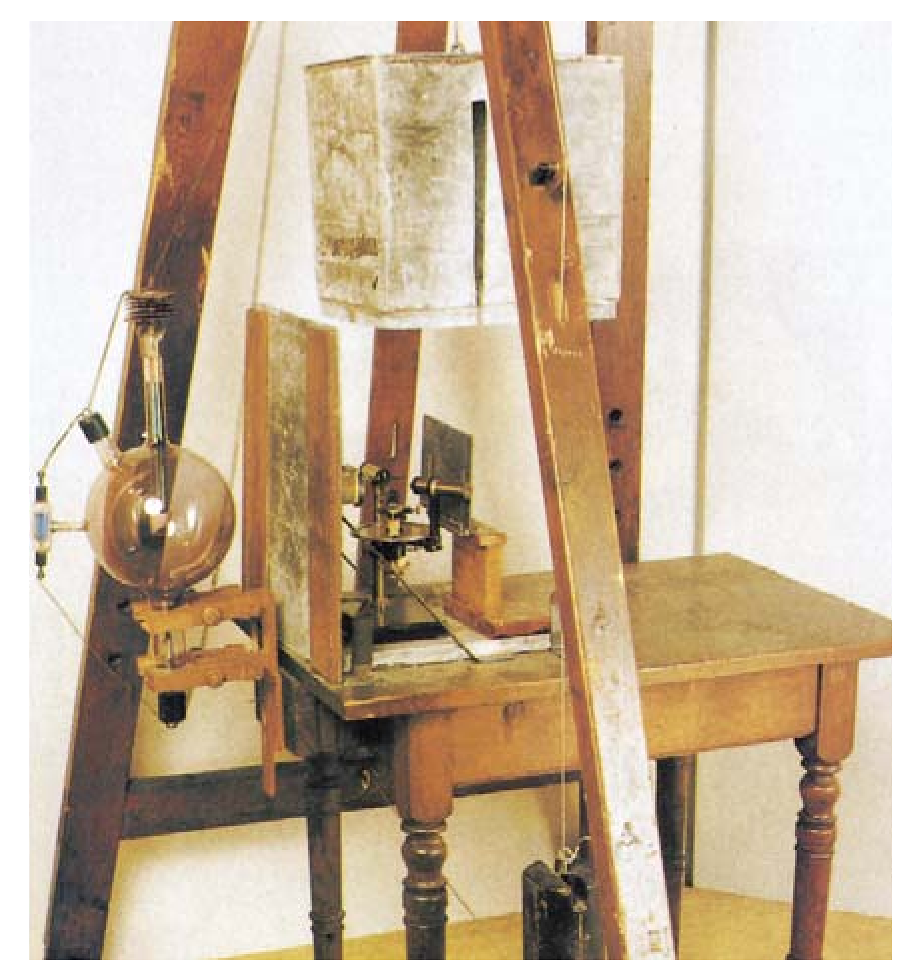
su última voluntad y su testamento, en el que dotaba los premios que llevan su nombre. En 1901 se otorgó el primer premio Nobel de física a Röntgen. El comité de concesión votó abrumadoramente a su favor, a pesar de que la competencia era excepcional. De los otros once nominados, ocho ganarían más tarde el galardón.

Recibió del príncipe heredero de Suecia la medalla y pronunció un elocuente discurso de agradecimiento en el banquete que se celebró a continuación, pero se marchó al día siguiente, renunciando con timidez a la lección magistral de la concesión del Nobel. Aunque había aceptado hacía poco un puesto en la Universidad de Munich, donde pasó el resto de su carrera académica, entregó el dinero del premio al departamento de física de Würzburg para que sirviese de ayuda económica a los estudiantes (los intereses de ese fondo se usan aún con ese propósito).

Pocos meses después del descubrimiento, aparecieron varias teorías opuestas sobre la naturaleza de los rayos X. Dos se difundieron especialmente. Para una de ellas los rayos eran impulsos (destellos breves) de energía electromagnética, que se emitían cuando los rayos catódicos golpeaban súbitamente la materia y se paraban. Según la otra, no eran sino un tipo más de onda electromagnética, como la luz visible pero con una longitud de onda mucho menor. Hasta 1912 no se obtuvo una prueba importante en favor de la segunda teoría, y la proporcionó un experimento hecho en Munich.

Max T. F. von Laue, del Instituto de Física Teórica, sugirió brillantemente que, si la teoría ondulatoria era correcta, los cristales deberían difractar los rayos X; creíase con razón que los cristales estaban constituidos por átomos espaciados de forma regular. Von Laue pasó la idea a dos alumnos, Walter Friedrich y Paul Knipping, quienes enseguida obtuvieron unos impresionantes patrones que indicaban que el haz de rayos X había, en efecto, sido difractado por los cristales de sulfuro de zinc.

En contra de lo que suele afirmarse, los resultados de Friedrich y Knipping no le dieron un golpe fulminante y mortal a la teoría rival. Pocos meses después de que se anunciasen sus resultados, Hendrik A. Lorentz, de la Universidad de Leiden, mostró, en un alarde de virtuosismo teórico, que también cabía explicarlos con la teoría de los impulsos. Ningún experimento concreto pudo refutar ésta, y el consenso en favor de la teoría ondulatoria se fraguó sólo gradualmente.



4. APARATO que emplearon Walter Friedrich y Paul Knipping para demostrar, por sugerencia de Max T. F. von Laue, que los rayos X se difractaban al paso por una red cristalina.

El historiador de la ciencia Arne Hessenbruch, de la Universidad de Cambridge, ha aportado hace poco unas ideas importantes sobre los factores que condujeron a ese consenso. Ha señalado que la influyente y floreciente comunidad de los radiólogos médicos consideraba ya en 1907 de forma rutinaria que los rayos X eran ondas electromagnéticas, y que sus miembros abrazaron siempre la teoría ondulatoria. Su aceptación, demostrablemente prematura, de la teoría ondulatoria contribuyó a marginar la teoría de los impulsos.

Y además la teoría ondulatoria daba una explicación simple y coherente de las observaciones que Röntgen efectuó en Würzburg. Cuando su haz de rayos catódicos cargados negativamente (electrones) golpeaba el extremo del tubo de vacío, se frenaban rápidamente y perdían toda o casi toda su energía de movimiento. Igual que cualquier partícula cargada, cuando un electrón se acelera o se desacelera emite radiación electromagnética. Y esto fue lo que Röntgen detectó en la forma de rayos X muy penetrantes.

Hasta su muerte de cáncer intestinal en 1923 no dejó de aprovechar su fama para promover la causa de la física en Alemania. El museo alemán de historia de la técnica se construyó en Munich y no en Berlín, el emplazamiento favorito al principio, gracias en parte a su influencia sobre el emperador Guillermo II. El biógrafo más reciente de Röntgen, la periodista Angelika Schedel, ha encontrado indicios de peso de que disfrutaba con su labor política mucho más de lo que normalmente se cree.

Aunque se le suele pintar inaccesible e introvertido, Schedel señala que se ganó esa reputación seguramente a causa de sus prolongadas ausencias de la universidad mientras cuidaba con devoción de su esposa, que murió de un ataque de cólico renal en 1919. Abatido, se retiró al año siguiente.

Lo que quizá más sorprenda del descubrimiento de los rayos X es que no ocurriera antes. Muchos otros científicos tenían el equipo sufi-



5. EL DESPACHO 119A de la Escuela Técnica de Würzburg, convertido hoy en sala-museo. Allí Röntgen descubrió los rayos X la noche del viernes 8 de noviembre de 1895. Quizá sea sorprendente que el descubrimiento no se hiciera antes: cientos de físicos hacían experimentos parecidos por entonces.

ciente para hacer las observaciones necesarias, y sin lugar a dudas los efectos de los rayos X se habían visto, aunque no se los reconociese, mucho antes de 1895. Unos quince años antes, William Crookes, de la Universidad de Londres, tomó nota de que las placas fotográficas que guardaba cerca de sus tubos de rayos catódicos a menudo estaban nubladas, y hasta devolvió algunas al fabricante quejándose de que no eran satisfactorias.

Varios científicos sostuvieron que habían descubierto los rayos catódicos antes que Röntgen, y muchos otros despreciaron su obra como mero fruto de la suerte. El más agrio de los descontentos fue Lenard, el ayudante de Hertz; creía que Röntgen debería haber reconocido su trabajo. Poco antes del hallazgo de los rayos había diseñado un tubo de rayos catódicos cuidadosamente modificado, y Röntgen obtuvo del propio Lenard un ejemplar, pero no lo usó en su descubrimiento; sin embargo, Lenard hizo el desabrido comentario de que "si Röntgen fue la nodriza del descubrimiento de los rayos X, yo fui la madre." Röntgen no contestó ni a éste ni a otros comentarios despectivos.

No cabe duda de que Röntgen estaba excepcionalmente bien situado para hacer el descubrimiento. Disponía de un equipo formidable y aportó una habilidad experimental prodigiosa, amén de un profundo conocimiento de la física. Entonces, ¿tuvo suerte? La respuesta ha de ser sí, en caso de que se pueda decir que es suerte lo que sucede cuando una oportunidad extraordinaria coincide con una preparación que no le anda a la zaga.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WILHELM CONRAD RÖNTGEN AND THE EARLY HISTORY OF THE ROENTGEN RAYS. Otto Glasser. (Reimpresión de la edición de 1934.) Norman Publishing, 1993.

THE LIFE OF WILHELM CONRAD RÖNTGEN, DISCOVERER OF THE X-RAY. W. Robert Nitske. University of Arizona Press, 1971.

NEW KINDS OF RAYS. En *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Abraham Pais. Oxford University Press, 1986.

MULTIPLE EXPOSURES: CHRONICLES OF THE RADIATION AGE. Catherine Caufield. University of Chicago Press, 1990.

EARLY MEDICAL APPLICATIONS OF X-RAYS. Arne Hessenbruch en *Physics Education*, vol. 30, n.º 6, noviembre, 1995.

La ciencia del malabarismo

El estudio de la destreza en el lanzamiento y recogida de bolas y aros permite calar en la coordinación en los humanos, en la robótica y en la matemática

Peter J. Beek y Arthur Lewbel

Para rematar una entrega de municiones, un artificiero de 73 kilos tiene que cruzar un puente muy endeble que salva a gran altura una profunda garganta. El puente sólo puede soportar 75 kilos. El problema es que el artificiero ha de llevar tres granadas de artillería de un kilo de peso cada una, y sólo tiene tiempo para cruzar el puente una vez. La solución habitual de este viejo rompecabezas es que el artillero cruzó el puente haciendo malabarismos con las granadas. La verdad es que los malabarismos de nada hubieran servido; al atrapar una granada lanzada al aire, la fuerza ejercida sobre el puente excedería del límite máximo. El artificiero acabaría en el fondo de la garganta.

Aunque no resulten prácticos en este caso, lo cierto es que los malabarismos tienen aplicaciones ajenas a la afición personal o al mundo del espectáculo. Son de complejidad suficiente para poseer propiedades interesantes, a la vez que lo bastante simples para consentir la modelización de tales propiedades. Proporciona, pues, un contexto en el cual examinar otros campos más complejos. Tres han sido, en particular, los que se han beneficiado.

Está en primer lugar el estudio de los movimientos del cuerpo humano y la coordinación de sus extremidades. Viene después la robótica y la construcción de máquinas malabaristas, que suministran buenos bancos de pruebas en los que desarrollar y aplicar los principios del control mecánico en tiempo real. Y por último, las matemáticas: las figuras trazadas por los malabarismos presentan propiedades numéricas sorprendentes.

De arte a ciencia

Los malabarismos no nacieron ayer. Conocemos una descripción egipcia, que aparece en la decimoquinta tumba de Beni Hassan, perteneciente a un príncipe del Imperio Medio, entre 1994 y 1781 antes de Cristo. Empero, el primer estudio científico de que se tiene noticia salió a la luz en 1903; en ese año, Edgar James Swift publicó un artículo en el *American Journal of Psychology* documentando la rapidez con que ciertos estudiantes aprendían a lanzar dos bolas con una mano. Los primeros ordenadores electrónicos, allá por los años cuarenta, se estaban utilizando para calcular las trayectorias de objetos lanzados; también por entonces se fundó la Asociación Internacional de Malabarismo. Los dos decenios siguientes vieron unas cuantas aplicaciones dispersas, continuación, en su mayoría, del trabajo de Swift, que se valían del malabarismo como tarea con la cual comparar métodos generales de aprendizaje de destrezas sensorio-motoras.

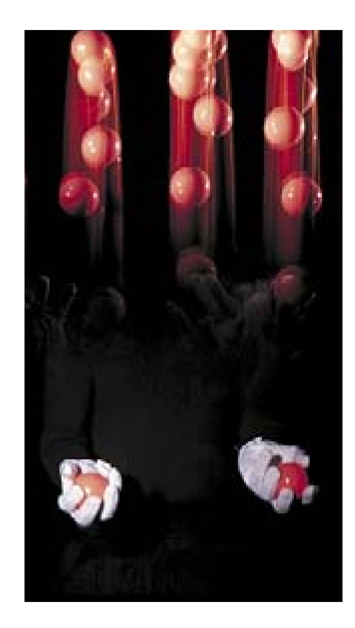
Por último, en los años setenta, el malabarismo comenzó a estudiarse por sus propios méritos, como prueban ciertos acontecimientos que se produjeron en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Claude E. Shannon creó allí sus máquinas malabaristas y formuló su teorema del malabarismo, en el que establecía la relación entre la posición de las bolas y la acción de las manos. Seymour A. Papert y otros investigadores asignados al Proyecto MAC (que más tarde se convirtió en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT) investigaron de qué forma lograban las personas dominar el arte malabar; llegó incluso a fundarse el club de malabarismo del MIT, una de las organizaciones más antiguas dedicadas al malabarismo aficionado todavía existentes. En los años ochenta, y de la mano de diversos investigadores que desarrollaron una notación especial para resumir las figuras que se crean en ese arte, nació la matemática del malabarismo.

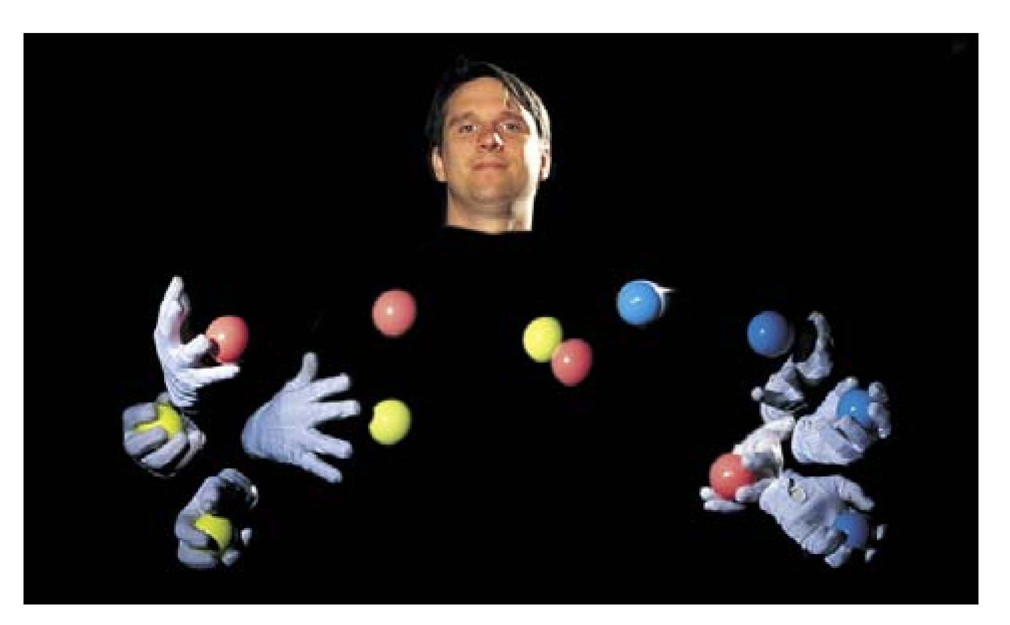
La mayoría de los neófitos que intentan malabarismos con tres bolas tratan de describir con ellas un círculo, la figura llamada “chaparrón”; no saben que es mucho más fácil la figura “en cascada”, en la cual las manos van alternativamente lanzándose bolas una a la otra, describiendo las bolas un ocho. Con frecuencia bastan unas pocas horas o días para aprender a manejar tres bolas. Pero los tiempos de aprendizaje pueden ser de semanas o meses para malabarismos con cuatro bolas, y de meses o años para dominar cinco, plazo necesario para que los ejecutantes refinen su sentido del tacto y del lanzamiento.

PETER J. BEEK y ARTHUR LEWBEL son capaces de hacer malabarismos con tres y ocho bolas, respectivamente. Beek enseña en el departamento de movimiento humano de la Universidad Libre de Amsterdam. Entre sus campos de investigación se cuentan la coordinación rítmica entre las extremidades, el acoplamiento recepción-acción y el desarrollo de la motricidad. Ha escrito varios artículos sobre malabarismos y la oscilación de los péndulos. Lewbel, que se doctoró en la escuela Sloan de ciencias empresariales adscrita al Instituto de Tecnología de Massachusetts, es en la actualidad profesor de economía en la Universidad de Brandeis.

1. EL MALABARISTA EXPERTO fía más en el sentido del tacto y menos en la vista que los principiantes. Por ello, un profesional es capaz de realizar con los ojos vendados las figuras corrientes durante varios minutos, desde el simple intercambio de bolas (*página contigua*) hasta la fuente de cuatro y la cascada de tres (*página 74, arriba*).







El récord del mundo para el máximo número de objetos (en el que cada objeto se lanza y atrapa por lo menos una vez, lo que se llama un “flash”) es de 12 aros, 11 bolas u ocho bolos. El tipo de objetos manejados influye en el número, porque varía su orientación correcta así como la dificultad de asirlos y lanzarlos y el margen de error para evitar colisiones.

Limitaciones en la curva de aprendizaje

Las restricciones obvias de carácter físico que afectan a la destreza y limitan el número de objetos manipulados nacen de la gravedad; más en concreto, de la mecánica newtoniana. Cada bola ha de lanzarse a altura suficiente para que el malabarista tenga tiempo de habérselas con las demás. El tiempo de vuelo de una bola es proporcional a la raíz cuadrada de la altura a que llega. La necesidad de mayor velocidad o de mayor altura crece rápidamente con el número de objetos manipulados.

Está después la imperfección humana, causa de errores espaciales y temporales. Con lanzamientos a poca altura, el espacio para evitar las colisiones es corto, y requiere, pues, recepciones y lanzamientos rápidos, con riesgo de errores. Los lanzamientos altos dan más tiempo para evitar los errores y para corregirlos, pero también los fallos se abultan. En el caso de lanzamientos a un par de metros, una desviación de sólo dos o tres grados en el lanzamiento puede causar errores de 30 centímetros o más en el punto de caída.

Las restricciones temporales que pesan sobre el malabarismo quedan elegantemente resumidas en el teorema de Shannon, que determina las relaciones que deben existir entre los tiempos en que las manos están vacías u ocupadas y el tiempo que cada bola pasa en el aire. Con otras palabras, al aumentar el número de bolas queda menor margen para variar la velocidad de manipulación. Si tuviéramos que manejar muchas bolas hasta una determinada altura, el teorema señala que incluso la más mínima variación en la velocidad de lanzamiento destruiría la regularidad del trazado.



2. LA REPRESENTACION más antigua que se conoce de los malabarismos muestra a diestras mujeres egipcias en la decimoquinta tumba de Beni Hassan, correspondiente a un príncipe desconocido del Imperio Medio, entre 1994 y 1781 antes de la era cristiana.

La forma en que los malabaristas coordinan sus miembros para moverse rítmicamente y a una misma frecuencia, respetando todas estas restricciones, se ha convertido en uno de los focos principales del estudio del movimiento de los humanos. Los investigadores han tomado conceptos de la teoría matemática de osciladores acoplados.

En la oscilación acoplada, el fenómeno clave es la sincronización, a saber, la tendencia de dos miembros a moverse a la misma frecuencia. El tipo particular de coordinación que ofrecen las manos depende de la figura que realiza el malabarista. En la “cascada”, por ejemplo, el cruce de las bolas entre las manos exige que una mano vaya atrapando al mismo ritmo que lanza la otra. Las manos también actúan por turnos: una mano atrapa una bola después de haber lanzado su par la otra.

La figura denominada “fuente”, por el contrario, admite dos formas de realización estable: sea lanzando (y atrapando) las bolas al mismo tiempo con ambas manos (en sincronía), sea lanzando una bola con una mano y recibiendo al mismo tiempo otra bola en la otra mano (asincronía). Es posible, en teoría, realizar la fuente con frecuencias diferentes en una y otra manos, pero tal coordinación es difícil, por la tendencia de los miembros a sincronizarse.

La definición de las restricciones físicas y temporales del malabarismo constituye uno de los aspectos del análisis. Un modelo realista debe incluir al menos otros tres factores que lo complican. En primer lugar, la oscilación de la mano malabarista no es uniforme, porque ésta

se encuentra ocupada con una bola durante parte de su trayectoria y vacía durante el resto. En segundo lugar, los movimientos de ambas manos están afectados por las exigencias físicas de precisión en el lanzamiento y recogida. En tercer lugar, la temporización entre las manos se basa en una combinación de la vista, el tacto y la memoria.

Estos tres factores son responsables de la variabilidad intrínseca de las figuras malabares: por muy segura que sea una serie, no hay dos lanzamientos ni dos recogidas exactamente iguales. El análisis de esta mutabilidad nos abre el camino para entender la estrategia general de los malabaristas a la hora de producir una figura duradera, que haga mínimas las interrupciones.

PERSPECTIVA DE LA MANO
PRIMERA BOLA
SEGUNDA BOLA
TERCERA BOLA
LA MANO SOSTIENE UNA BOLA
LA MANO ESTA VACIA
PERSPECTIVA DE LA BOLA
MANO DERECHA
MANO IZQUIERDA
BOLA EN UNA MANO
BOLA EN VUELO
TIEMPO

3. EL TEOREMA DEL MALABARISMO, propuesto por Claude E. Shannon del Instituto de Tecnología de Massachusetts, está esquemáticamente representado en el caso de la cascada con tres bolas. La ecuación exacta es $(F + D)H = (V + D)N$, donde *F* es el tiempo que una bola pasa en el aire, *D* el que pasa en una mano, *V*, el tiempo en que la mano está vacía, *N* es el número de bolas manipuladas, y *H* el número de manos. El teorema se demuestra siguiendo un ciclo completo del malabarismo visto desde la mano y desde la bola, e igualando ambos.

Estrategia general

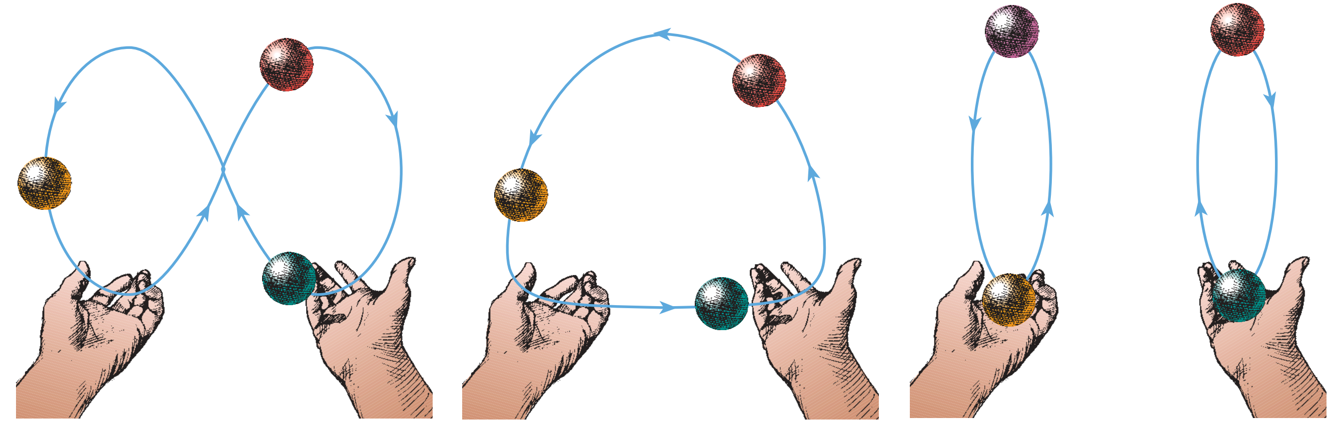
Las variables sometidas a un control más rígido son las asociadas con el lanzamiento (ángulo de liberación, velocidad de liberación, localización de los lanzamientos, altura de los mismos). Los malabaristas procuran lanzar las bolas con tanta regularidad como les es posible, y la distribución temporal de los lanzamientos ha de obedecer al teorema de Shannon. Dada una altura, una medida crucial del ritmo de malabarismo es la llamada razón o coeficiente de permanencia, que se define como la fracción del tiempo que una mano mantiene asida una bola entre dos recogidas (o dos lanzamientos). En general, si tal razón tiene valor elevado, la probabilidad de colisiones en el aire será pequeña. Ello se debe a que la mano alberga la bola durante un tiempo bastante largo y tiene, por tanto, ocasión de lanzar con precisión. Si la razón de permanencia es pequeña, el número medio de bolas en el aire, ponderado respecto al tiempo, crece, lo cual resulta favorable para efectuar correcciones, porque las manos disponen de más tiempo para volver a sus lugares.

Los malabaristas noveles optarán por razones de permanencia más bien grandes, haciendo hincapié en la precisión de los lanzamientos. Los malabaristas más duchos tienden hacia valores más bajos, en especial al manejar tres bolas, porque así disponen de mayor flexibilidad para variar la figura. Las mediciones efectuadas por uno de los autores (Beek) demuestran que la razón alcanzada en los malabarismos en cascada varía aproximadamente entre 0,5 y 0,8, siendo las razones cercanas a 3/4, 2/3 y 5/8 las habituales. Es decir, en una cascada con tres bolas, las bolas pueden pasar hasta el doble de tiempo en el aire que en contacto con las manos. Semejante gama de valores parece indicar que los malabaristas buscan un término medio entre la estabilidad y la flexibilidad, que ajustan según los errores y las perturbaciones exteriores. Además, la tendencia hacia razones de permanencia dadas por fracciones sencillas ilustra de modo sutil la propensión humana a buscar soluciones rítmicas para las tareas físicas.

Aparte el ojo de la bola

El malabarismo con más de tres bolas deja menos margen de variación de la razón, pues resulta preciso lanzar las bolas a mayor altura y, por tanto, con mayor precisión. Tal hecho limita mucho lo factible. El malabarismo con tres objetos ofrece abundante oportunidad de modificación y adaptación, así como para trucos y artificios. En el otro extremo,

Figuras malabares habituales



CASCADA DE TRES BOLAS

CHAPARRON DE TRES BOLAS

FUENTE DE CUATRO BOLAS (SINCRONIZADA)

hay pocas formas de malabarismo con nueve objetos.

Sin embargo, la modelización de las pautas de movimiento no aporta mucha luz sobre la coordinación necesaria entre la mano y el ojo. Los malabaristas han de diponer de información concerniente a los movimientos de las manos y de las bolas. Hay pocos contextos en los que el consejo típico de los entrenadores "Mantén la vista en la bola" tenga tan poco sentido como en los malabarismos. En ellos, es preciso que la atención se desplace de una bola a otra, por lo que el malabarista sólo ve una parte del vuelo de cada una.

¿Qué porción es la que proporciona mayor información y la que mayor atención visual requiere? En la enseñanza de malabarismos, las instrucciones más repetidas son "Mira al punto más alto" y "Lanza la bola cuando la anterior esté arriba del todo". No obstante, en 1974, siendo estudiante de posgrado en el MIT, Howard A. Austin investigó el tamaño que había de tener la región próxima al cenit que los ejecutantes de mediana destreza necesitaban ver para poder mantener el malabarismo. Para ello, colocó entre las manos y los ojos del malabarista una pantalla en forma de abanico, de la que había recortado una región angular. Se conseguían recepciones atinadas de la bola incluso cuando sólo eran visibles unos dos centímetros y medio de la parte alta de la trayectoria del vuelo. Ello corresponde más o menos a un tiempo de visión de unos 50 milisegundos; inferíase, pues, que un breve atisbo del cenit del vuelo de las bolas bastaba para mantener el malabarismo.

En 1994, Tony A. M. van Santvoord, de la Universidad Libre de Amsterdam, examinó con mayor finura la conexión entre los movimientos de las manos y la visión de la bola. Acudió a malabaristas de mediana destreza. Les colocó gafas de cristal líquido y les pidió que realizasen una cascada de tres; las antiparras, que se abrían y cerraban a intervalos prefijados, permitían sólo una visión intermitente de las bolas. A partir de la relación entre la trayectoria de las bolas en el aire y el ritmo definido por las gafas se podía deducir la ubicación de las bolas cuando los cristales estaban abiertos, las preferencias hacia cualesquiera

Bases matemáticas de los malabarismos

Un procedimiento conveniente, utilizado por muchos malabaristas para resumir sus figuras, es la notación transposicional, inventada hacia 1985 por Paul Klimek, de la Universidad de California en Santa Cruz, por Bruce Tiemann, del Instituto de Tecnología de California, y por Michael Day, de la Universidad de Cambridge, sin que se pusieran en previo acuerdo. El sistema transposicional constituye una notación compacta para representar el orden en que se atrapan y lanzan en cada ciclo los objetos malabares, basándose en la hipótesis de que los lanzamientos tienen lugar a golpes de metrónomo equidistantes en el tiempo.

Para comprender su funcionamiento, fijémonos en la cascada básica con tres bolas. La primera bola se lanza en los instantes 0, 3, 6 ..., la segunda, en los instantes 1, 4, 7... y la tercera bola, en los instantes 2, 5, 8... Para caracterizar la pauta, la notación transposicional se vale del tiempo entre lanzamientos. En la cascada, el tiempo entre dos lanzamientos de una cualquiera de las bolas es de tres pulsaciones, por lo que es denotada 33333..., o por brevedad, sencillamente 3. La notación para el chaparrón de tres bolas (primera bola 0, 5, 6, 11, 12 ..., segunda bola 1, 2, 7, 8, 13..., tercera bola 3, 4, 9, 10, 15....) consta de dos dígitos, 51, donde el 5 se refiere a la duración del lanzamiento alto y 1 al tiempo necesario para pasar la bola de una mano a otra por la parte inferior del arco. Otras transposiciones con tres bolas son 441, 45141, 531 y 504 (0 representa un descanso, en que no se efectúan ni lanzamientos ni recepciones).

La forma más sencilla de descifrar una expresión transposicional para descubrir el procedimiento real de lanzamiento consiste en dibujar una serie de semicírculos sobre un eje graduado en unidades de tiempo. Los puntos con numeración par corresponden a lanzamientos de la mano derecha, mientras que los de numeración impar indican lanzamientos de la mano izquierda.

Sea, por ejemplo, la pauta 531. Escribamos los números 5, 3, y 1 varias veces seguidas, poniendo cada dígito bajo los puntos consecutivos del eje graduado a partir del punto 0 [*véase la ilustración superior, a la derecha*]. El número escrito debajo del punto 0 es 5, por lo que a partir de aquí se dibuja un semicírculo de cinco unidades de diámetro, que alcanza hasta el punto 5, y que representa un lanzamiento de altura suficiente para pasar en el aire cinco unidades de tiempo (pulsaciones). El número situado debajo del punto 5 es un 1, por lo que se traza un semicírculo de diámetro 1 que va del punto 5 al 6. El punto 6 tiene un 5 debajo de sí, por lo que el semicírculo siguiente va desde el punto 6 al 11. Hemos acabado ahora de trazar la trayectoria que la primera bola describe en el tiempo, que resulta ser la misma que la primera bola en la pauta 51 del chaparrón con tres bolas anteriormente descrito. Repítase el proceso empezando en los instantes 1 y 2, respectivamente, al objeto de trazar la senda de las dos bolas restantes. El resultado es que la primera y la tercera bolas se mueven ambas según la pauta del chaparrón, aunque en sentidos opuestos, y la segunda bola va y viene entre los dos chaparrones con ritmo de cascada. Al dejar fuera esta bola central, resulta la pulcra y sencilla transposición 501, con dos bolas.

No todas las secuencias de números pueden traducirse a pautas lícitas de malabarismo. Por ejemplo, la secuencia 21 provoca el aterrizaje simultáneo de ambas bolas en la misma mano (aunque variantes más complicadas de la notación transposicional permiten que se atrape o lance más de una bola al mismo tiempo, hazaña que los malabaristas llaman multiplexación).

La notación transposicional ha llevado a la invención de ciertas pautas, como la 441, que están ganando popularidad porque ofrecen buen aspecto al ejecutarlas, o porque sirven de ayuda para dominar otras rutinas, como la pauta 5551 con cuatro bolas, que es el preludio para aprender la cascada con cinco bolas. Existen varios programas de ordenador capaces de animar series transposicionales arbitrarias y de identificar las teóricamente realizables. Tales programas permiten a los malabaristas ver qué aspecto ofrece una cierta figura antes de intentarla o les permiten, sencillamente, echar una mirada a trucos humanamente imposibles.

Las ristras de números que resultan en pautas legítimas poseen propiedades matemáticas inesperadas. Por ejemplo,

segmentos de las trayectorias durante la visión, así como el grado de coordinación entre los movimientos de la mano y la información visual.

En ciertas ocasiones, los sujetos modificaban sus malabarismos para adaptarlos a la frecuencia de apertura y cierre de los cristales. En tales casos, las bolas quedaban visibles inmediatamente después de alcanzar el cenit. Los experimentos sugerían también que la visión de las bolas resulta menos importante si se ha practicado lo suficiente. En general, los malabaristas principiantes o de nivel medio se basan sobre todo en la vista. Los ejecutantes expertos se fían más de las sensaciones táctiles debidas al contacto entre las bolas y las manos. A este respecto, William James, en su obra *The Principles of Psychology*, de 1890, hacía notar que el malabarista Jean-Eugène Robert-Houdin podía practicar con cuatro bolas mientras leía un libro. Muchos malabaristas diestros pueden actuar durante varios minutos con los ojos vendados. ¿Por qué?

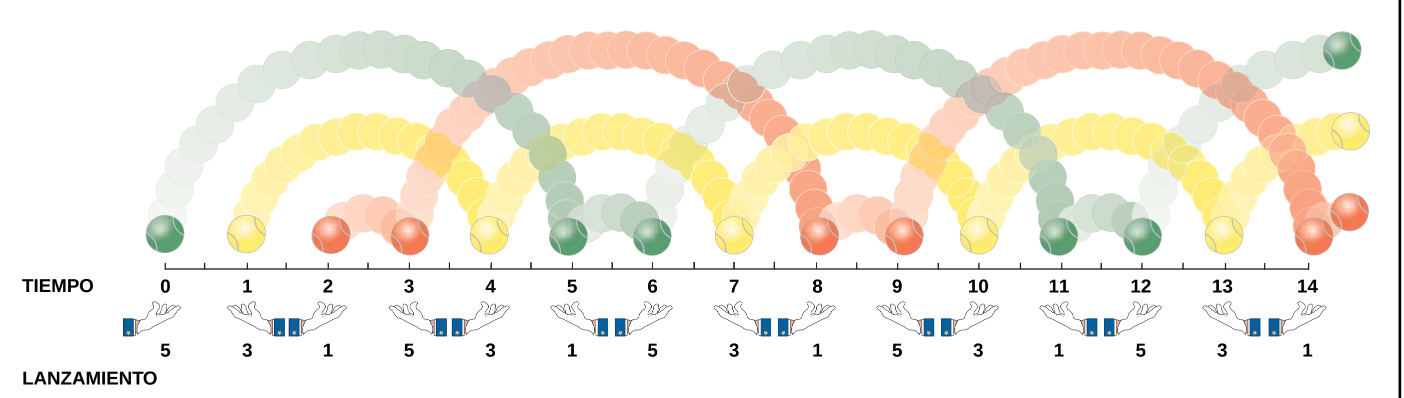
Una hipótesis plausible consiste en que la observación de la bola en movimiento va gradualmente calibrando el sentido del tacto en el proceso de aprendizaje. Un experto detecta inmediatamente una leve desviación en el ángulo de salida deseado o en la energía impartida a la bola, mientras que el principiante tiene que observar el efecto de los errores sobre las trayectorias de vuelo. En consecuencia, las correcciones del experto suelen efectuarse sin perturbar apenas la integridad de la figura. Es frecuente que los reajustes realizados por malabaristas menos diestros interrumpan la estabilidad general de la ejecución.

Robots malabaristas

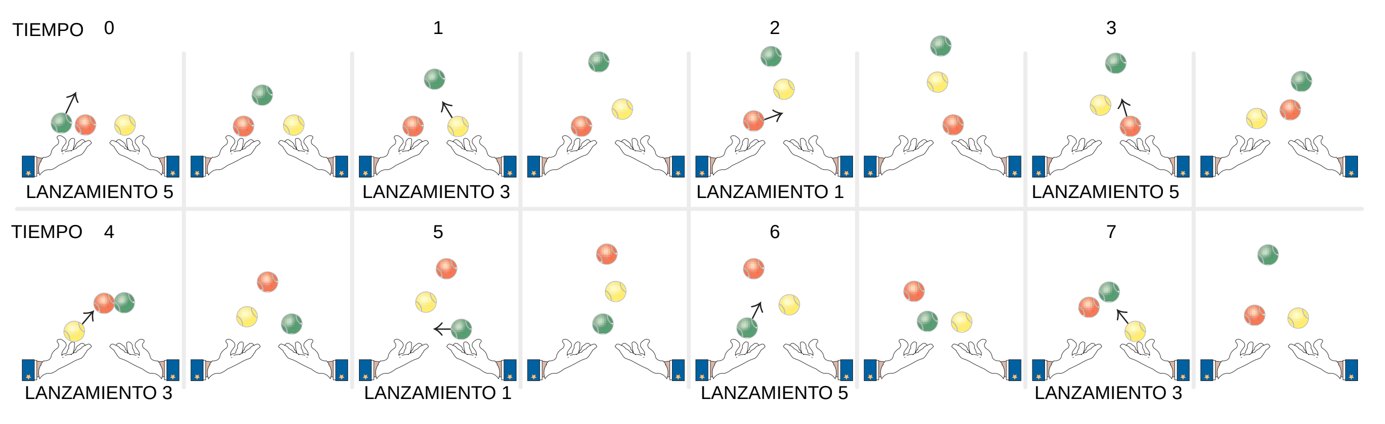
La comprensión de los malabarismos ha inducido a los investigadores a querer reproducir mediante robots esas proezas de algunos humanos. Tales máquinas servirían de punto de partida para autómatas más perfeccionados. La verdad es que el malabarismo tiene muchos de los elementos de la vida ordinaria, como puede ser la conducción de un automóvil por calles con tráfico denso, atrapar una pelota al vuelo en un día ventoso o ir de un sitio a otro por una estancia muy llena. Todas esas

el número de bolas necesarias para una pauta determinada es igual al promedio numérico de los números que forman la secuencia transposicional. Así pues, la pauta 45141 requiere (4 + 5 + 1 + 4 + 1)/5, o sea, tres bolas. El número de series transposicionales legítimas cuya longitud es *n* dígitos y que utilizan *b* (o menos) bolas es exactamente igual a *b* elevado a la *n*-ésima potencia. A pesar de su sencillez, la fórmula resultó sorprendentemente difícil de demostrar.

La teoría transposicional no se acerca siquiera a la descripción completa de todas las posibles hazañas malabarísticas, porque solamente se ocupa del orden en que se lanzan y atrapan las bolas. Deja de lado la ubicación y el estilo de lanzamientos y recepciones. Muchos de los trucos de malabarismo de aprendizaje más populares, como el lanzamiento por debajo de la pierna o desde la espalda, se realizan formando parte de una cascada ordinaria, y tienen, por tanto, la misma notación transposicional.



Traducción de la serie transposicional 531



La serie 531 en acción

tareas requieren prever con exactitud los acontecimientos que están a punto de producirse, para organizar las acciones inmediatas.

Shannon fue un adelantado de la robótica malabarística; en los años setenta construyó con piezas de mecano una máquina rebotadora. En ella, bolitas de acero rebotaban sobre un parche de tambor bien tenso, produciendo un "zunk" muy satisfactorio en cada impacto. Cuesta menos conseguir el malabarismo de rebote que el de lanzamiento, porque las bolas se atrapan en lo alto de sus trayectorias, cuando su velocidad es mínima.

En la máquina de Shannon, los brazos están cada uno fijo con relación al otro. La unidad oscila con un sencillo balanceo, efectuando cada lado una recogida cuando oscila hacia abajo y un lanzamiento cuando lo hace hacia arriba. Los errores de lanzamiento se corrigen usando, en vez de manos, pistas cortas con surcos. Las bolas, atrapadas cerca del cenit de su vuelo, caen en el surco; la oscilación descendente del brazo hace rodar la bola hacia la parte trasera de la pista, impartiéndole así suficiente energía para hacer un lanzamiento. La construcción original de Shannon manejaba tres bolas. Christopher G. Atkeson y Stefan K. Schaal, del Instituto de Tecnología de Georgia, construyeron más tarde una máquina capaz de habérselas con cinco, basándose en los mismos principios.

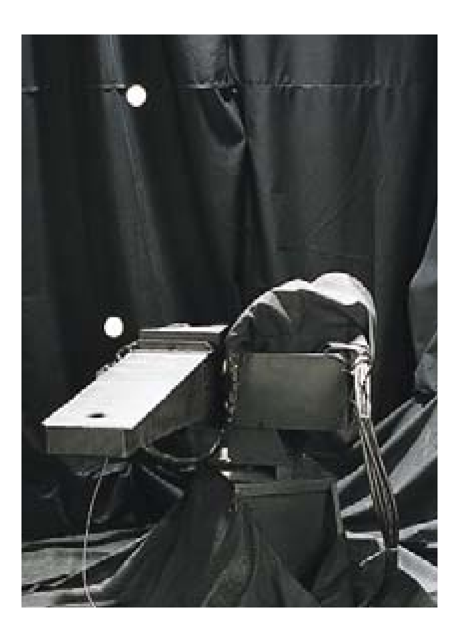
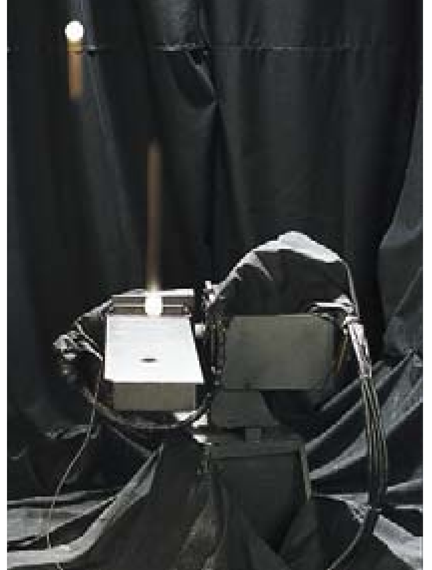
Aunque los robots rebotadores revelen gran sagacidad, todavía está por construir un robot capaz de lanzar una cascada de tres bolas y corregir activamente los errores. Se han logrado, empero, ciertos progresos. Se han ideado máquinas que pueden atrapar, batear y palear bolas al aire. Los ingenieros han construido también robots que hacen malabarismos en dos dimensiones. En los años ochenta, Marc D. Donner, del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de IBM, se valió de un plano inclinado sin fricción, similar a una mesa de aerohockey. Estaba equipado con dos mecanismos de lanzamiento que se movían sobre pistas a lo largo del borde inferior de la mesa.

En 1989, Martin Bühler, de la Universidad de Yale, y Daniel E. Koditschek, que actualmente se encuentra en la de Michigan, llevaron el trabajo un paso más allá. En lugar de un dispositivo de lanzamiento que corría sobre una pista, utilizaron una barra giratoria almohadillada con un cojín de billar para batear los "pucks" (discos de goma utilizados en hockey sobre hielo) sobre el plano, hacia arriba. Con el fin de controlar la barra y conseguir así un malabarismo periódico, se ayudaron del algoritmo especular.

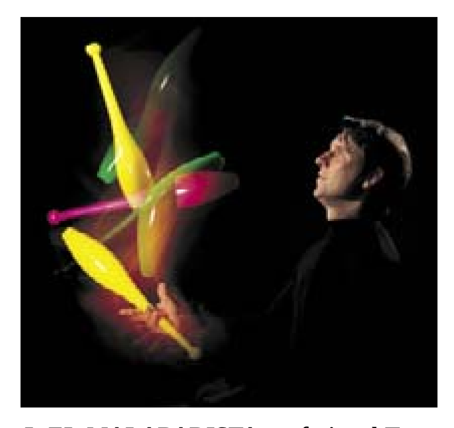
Esta noción, en esencia, combina dos ideas. La primera consiste en traducir (o "reflejar") la trayectoria continua del disco de goma sobre una trayectoria de referencia "en línea" para controlar el movimiento del robot (gracias a una función no lineal cuidadosamente seleccionada). Con el algoritmo especular no necesitamos disponer de información perfecta acerca del estado del disco en el impacto, que es difícil de obtener en la realidad. La segunda idea, destinada a estabilizar el movimiento vertical del disco, analiza la energía de la bola para ver si coincide con la energía ideal correspondiente a un lanzamiento perfecto. Así pues, el programa registra la posición del disco, calcula la trayectoria especular de referencia, así como las energías real y deseada del disco, y resuelve en qué momento y con cuánta fuerza ha de golpeársele. Provisto de una versión generalizada del algoritmo especular, el robot puede realizar también una especie de malabarismo bidimensional, con dos discos y una mano. Golpea al disco directamente hacia arriba, alternativamente con la parte derecha y la izquierda de la barra pivotante, en dos columnas separadas.

La observación del algoritmo especular en acción produce desasosiego. Si se perturba uno de los discos, el brazo robot efectúa una serie de sacudidas y movimientos bruscos que a los malabaristas humanos les resultan del todo antinaturales, pero que provocan un mágico y rápido retorno al malabarismo continuo. El algoritmo especular controla el bateo con gran inteligencia, pero no resulta generalizable al problema, más difícil, de malabarismos con recogida controlada.

Además del rebote y el bateo, los robots han gestionado multitud de otras actividades relacionadas con el


4. UN BRAZO ROBOT es capaz de mantener indefinidamente dos bolas en una configuración de fuente. Una cámara registra el vuelo de las bolas y un algoritmo malabarístico especial, capaz de corregir los errores y de modificar la cadencia de rebote, controla el movimiento del robot. El aparato fue construido por Daniel Koditschek y Alfred Rizzi. Pese a tales avances, ningún robot puede hacer malabarismos que se parezcan de cerca a los ejecutados por el hombre.



5. EL MALABARISTA profesional Tony Duncan, cuyas hábiles manos aparecen en las fotografías de presentación, también hace malabarismos con bolos.

malabarismo, entre ellas, hacer saltar palitos de un lado a otro, botes sobre el propio terreno, equilibrios, lanzamientos y recepciones de bolas en una mano con forma de embudo y una variante del pingpong. Pese a tales avances, ningún robot puede hacer malabarismos que se parezcan de cerca a los ejecutados por las manos del hombre. Pero la ciencia del malabarismo es un campo relativamente nuevo y el paso con que se ha progresado a lo largo de los dos últimos decenios ha sido muy notable. Puede que no se tarde mucho en preguntar, ¿cómo logró el robot cruzar el puente desvencijado portando tres balas de cañón?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TEMPORAL PATTERNING IN CASCADE JUGGLING. Peter J. Beek y Michael T. Turvey en *Journal of Experimental Psychology*, vol. 18, n.º 4, páginas 934-947; noviembre de 1992.

SCIENTIFIC ASPECTS OF JUGGLING. En *Claude Elwood Shannon: Collected Papers*. Compilación de N. J. A. Sloane y A. D. Wyner. IEEE Press, 1993.

JUGGLING DROPS AND DESCENTS. J. Bühler, D. Eisenbud, R. Graham y C. Wright en *American Mathematical Monthly*, vol. 101, n.º 6, páginas 507-519; junio-julio de 1994.

PHASING AND THE PICKUP OF OPTICAL INFORMATION IN CASCADE JUGGLING. Tony van Santvoord y P. J. Beek en *Ecological Psychology*, vol. 6, n.º 4, páginas 239-263; otoño de 1994.

JUGGLING BY NUMBERS. Ian Stewart en *New Scientist*, n.º 1969, páginas 34-38; 18 de marzo de 1995.

JUGGLING INFORMATION SERVICE. En World Wide Web, dirección, http://www.hal.com/services/juggle/

Ciencia y empresa

Sistemas de señalización

Flexibilidad y modularidad

Una red de telecomunicación es un conjunto estructurado de centrales de conmutación unidas entre sí mediante enlaces de transmisión. La señalización transforma a los elementos que integran la red en una entidad coherente y con capacidad de proveer servicios a los usuarios.

Los modernos sistemas de señalización son muy complejos, pues han de estar capacitados para manejar servicios multimedia —varias conexiones de distinto tipo (imagen, voz, datos) dentro de la misma llamada— y mostrarse accesibles a varios usuarios a la vez, como por ejemplo en una videoconferencia.

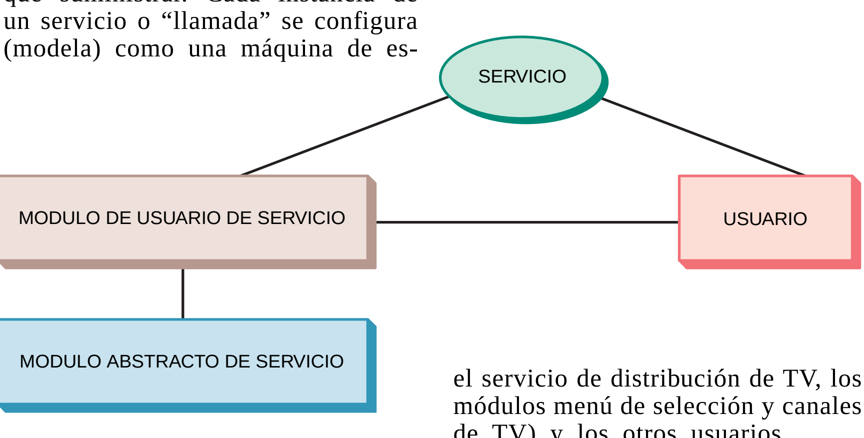
Hasta hace muy poco los protocolos de señalización se especificaban basándose en los servicios que tenían que suministrar. Cada instancia de un servicio o "llamada" se configura (modela) como una máquina de estados separada, en la que el estado de la llamada cambia a tenor de las diferentes funciones del servicio. Pero esa conformación encierra un inconveniente: para cada nuevo servicio que se quiera ofrecer debe ampliarse el protocolo de señalización. Lo que obliga a realizar un nuevo conjunto de mensajes con nuevos parámetros y cambiar las entidades que procesan dichos mensajes.

Es esencial que los sistemas de señalización presenten la flexibilidad necesaria para gestionar los nuevos servicios de telecomunicación y adaptar los ya existentes. Para conseguir dicha flexibilidad se ha buscado un nuevo enfoque en el diseño de los sistemas de señalización. Este nuevo enfoque se asienta sobre dos pilares: un nuevo sistema de especificación de los servicios de telecomunicación y la separación funcional entre control de llamada (CC) y control de conexiones (BC).

El nuevo sistema de especificación de servicios consiste en definir un conjunto de bloques funcionales, a cada uno de los cuales se le asigna una función simple, clara e independiente. Se pretende así que, con un conjunto escogido de bloques funcionales y con una serie de operaciones entre sí, pueda construirse cualquier servicio de telecomunicación.

La descripción de un servicio debe empezar a partir de la visión que tiene el usuario del mismo. El usuario ve tres cosas en un servicio: el contexto, los módulos (por ejemplo en el servicio de distribución de TV, los módulos menú de selección y canales de TV) y los otros usuarios.

Los módulos de usuario de servicio (MUS) se diseñan atendiendo a la óptica del interesado. Abarcan la voz, música estéreo, selección interactiva, película, canal de TV, etc. Los módulos pueden ser, asimismo, opcionales u obligatorios en cualquier servicio. Los MUS tienen que convertirse en medios de telecomunicación, de los que existen tres fundamentales, a saber, audio, vídeo y datos. A su vez, un MUS puede constar de varios módulos de medio, llamados módulos abstractos de servicio (MAS).

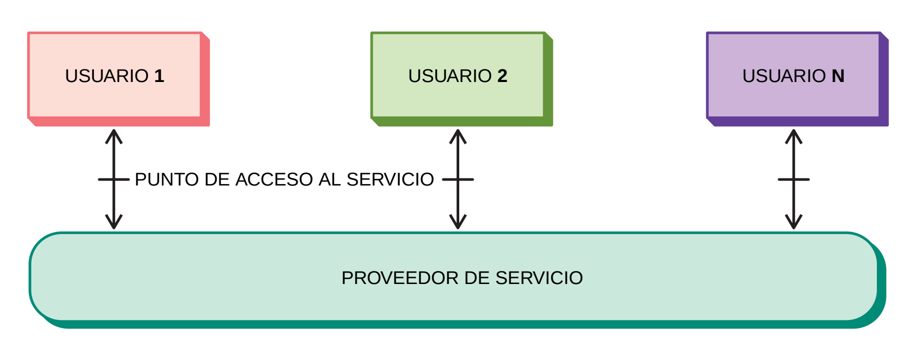


Descomposición de un servicio en módulos

La descripción estática de un servicio que acabamos de exponer se complementa con una descripción dinámica, que se centra en el papel que desempeñan el proveedor y cada tipo de usuario. La descripción dinámica de un servicio se especifica mediante máquinas de estados. Los usuarios acceden a través de un punto de acceso al servicio, es decir, de las interfaces externas que ofrece el proveedor.

La separación funcional entre control de llamada (CC) y control de conexiones (BC) permitirá realizar una señalización estructurada y modular. Podemos definir CC como el conjunto de procedimientos necesario para establecer, mantener y liberar una asociación entre puntos extremos de una comunicación. El CC se emplea para asegurar compatibilidad, disponibilidad, control de configuración y otros. Las funciones de CC se dividen en el control de la llamada en conjunto, el control de admisión de llamadas y la interacción con CC.

El control de la llamada en conjunto abarca diversas operaciones; así, procesar las peticiones de servicio, procesar las peticiones de servicios complementarios, coordinar la negociación entre participantes, identificar la llamada, interactuar entre CC adyacentes y mantener el estado de



Modelo dinámico de un servicio

la llamada. Pertenece al control de admisión de llamadas la discriminación de servicios, identificación de usuario, negociación de la calidad de servicio y la compatibilidad. Por último, la interacción con CC comprende solicitar el establecimiento y liberación de conexiones, la coordinación de combinaciones de conexiones y la recolección de información para tarificación.

Por su parte, el control de conexiones se encarga del establecimiento, mantenimiento y liberación de conexiones en una red de telecomunicación. Tiene una triple misión. Una primera relacionada con el control de las conexiones en su totalidad; y así le está atribuido el encaminamiento de las conexiones, mantenimiento del estado de las conexiones, identificación de las conexiones de BC y soporte de los servicios suplementarios para los aspectos de BC. La segunda función asignada es la del control de los recursos de red, esto es, la reserva y liberación de los recursos de red, la conexión y desconexión extremo a extremo y la negociación de los recursos de red. Por último, y en relación con su interacción con el control de llamada, entiende de las notificaciones a CC y envío de la información de tarificación a CC.

Múltiples son las ventajas que se obtienen con la separación del control de llamada y el control de conexiones. Entre las principales destacaría la mayor flexibilidad con que pueden controlarse y ofrecerse los servicios multimedia. Asimismo, pueden introducirse fácilmente nuevos portadores sin muchas modificaciones en el manejo de los servicios. También puede acometerse la negociación de la calidad y compatibilidad de servicio durante la fase de establecimiento, antes del establecimiento de las conexiones. Por último, las conexiones pertenecientes a la misma llamada pueden encaminarse de forma independiente.

ALBERT FABRELLAS
Telefónica. Investigación y Desarrollo
Madrid

Crecimiento vegetal

Almacenamiento de carbono

Mediante la fotosíntesis, los vegetales fijan el dióxido de carbono (CO_2) en sus moléculas orgánicas. Las plantas constituyen un sumidero importante en el ciclo global del carbono, hasta el punto de corresponderles en torno al 65 % de la absorción total de carbono de la biosfera. La mayor parte del carbono fijado por los vegetales se acumula en forma de material detrítico, que representa, en promedio, tres veces el almacenado en la planta viva (biomasa vegetal).

La identificación de los factores que controlan la cantidad de material vegetal detrítico acumulado en los ecosistemas reviste interés porque permite estimar gran parte de la capacidad total de los ecosistemas para almacenar carbono. Además, gracias a dicho conocimiento podemos valorar el papel potencial de ese detritus vegetal en el nuevo balance global de carbono provocado por las emisiones de CO_2 que resultan de la actividad humana.

Se ha demostrado que la producción de material vegetal detrítico en un ecosistema depende estrechamente de la producción primaria de este último. Llámase producción primaria a la cantidad de biomasa producida en un tiempo y superficie determinados. Se puede esperar, en consecuencia, que los ecosistemas más productivos sean los que tengan una mayor reserva de material vegetal detrítico, ya que son los que lo generan en mayor cantidad. Nosotros hemos demostrado, sin embargo, que la cantidad de material vegetal detrítico almacenado en un ecosistema no obedece a la capacidad productiva del mismo, sino a la tasa de crecimiento de las plantas que lo componen.

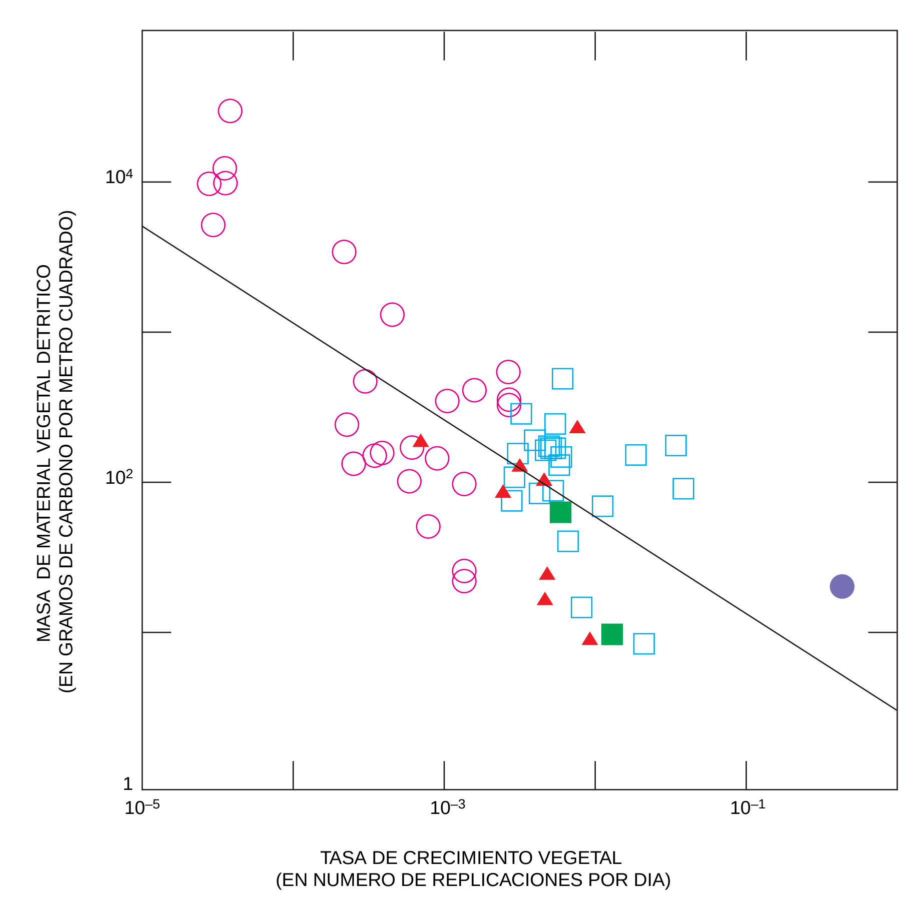
La tasa de crecimiento se estima a través de la producción de materia vegetal por unidad de biomasa. Indica el número de veces que la biomasa vegetal se renueva a sí misma por unidad de tiempo; por ello se la denomina también tasa de renovación. Este parámetro permite cuantificar la “velocidad de crecimiento” del vegetal; varía alrededor de seis órdenes de magnitud desde los árboles de crecimiento más lento (renuevan el 0,0001 % de su biomasa cada día) hasta las microalgas planctónicas (son capaces de replicar el 500 % de su biomasa cada día). Recientemente hemos demostrado que la tasa de crecimiento de los vegetales que componen un ecosistema permite pronosticar la capacidad del ecosistema para almacenar materia vegetal detrítica con una precisión del 75 %.

Probablemente, esa relación se debe a que los organismos detritívoros, cuyo metabolismo está limitado por el contenido en nutrientes del material detrítico, descomponen una mayor cantidad del material detrítico generado por plantas de crecimiento rápido que del generado por plantas de crecimiento lento; la razón de ello estriba en el mayor contenido en nutrientes de las primeras. Así, los ecosistemas dominados por plantas de crecimiento lento desarrollarán grandes reservas de materia vegetal detrítica. Por contra, en los ecosistemas con plantas de crecimiento rápido, la reserva de materia vegetal detrítica, aunque puede recibir entradas tan altas como en los ecosistemas de plantas de crecimiento lento, mantendrá un tamaño mucho menor.

Además, la tasa de crecimiento de las plantas que componen un ecosistema no sólo es un estimador potente de la capacidad de éste para almacenar material vegetal detrítico, sino que también está asociada a la cantidad de biomasa almacenada por el ecosistema. Al igual que la materia vegetal detrítica almacenada en un ecosistema, la biomasa almacenada no depende directamente de la capacidad productiva del ecosistema. Los árboles y bosques que conforman pueden almacenar 20 veces más carbono en sus troncos y hojas que las plantas de crecimiento relativamente más rápido. Estas últimas —pensemos en praderas de hierbas y de macroalgas— pueden mantener, a su vez, biomasas 100 veces más elevadas que las encontradas en los vegetales con el crecimiento más rápido, las microalgas planctónicas. De nuevo la causa parece recaer en el mayor consumo que los herbívoros ejercen sobre las plantas de crecimiento rápido, probablemente debido a su mayor contenido en nutrientes.

La asociación entre la tasa de crecimiento de las plantas que componen un ecosistema y su capacidad para almacenar carbono, tanto en forma de material vegetal vivo como detrítico, pronostica una reducción del carbono acumulado en los ecosistemas si las indicaciones sobre el aumento global de la tasa de crecimiento vegetal acaban confirmándose.

Por un lado, la deforestación conlleva el reemplazamiento de bosques por pastizales o campos de cultivos, plantas de crecimiento más rápido que los árboles. Tan sólo en los trópicos, la deforestación causa una pérdida anual de 11,3 millones de hectáreas de masa forestal. Además, el aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera, debido al uso de la madera deforestada y a la combustión de compuestos fósiles (ambos procesos liberan anualmente



Relación existente entre la tasa de crecimiento vegetal de las plantas que componen un ecosistema y el material vegetal detrítico almacenado en el ecosistema. Los símbolos corresponden a los siguientes tipos de plantas: (●) microalgas bentónicas, (▲) plantas de agua dulce, (■) angiospermas marinas, (□) hierbas terrestres y (○) árboles y arbustos. La línea representa la ecuación ajustada entre ambas variables

1,8 y 5 gigatoneladas de carbono a la atmósfera, respectivamente) puede favorecer más la proliferación de las plantas de crecimiento rápido que los árboles, bajo ciertas condiciones experimentales.

Por otro lado, y de acuerdo con modelos climáticos recientes, el calentamiento global promovido por el aumento atmosférico de CO_2 y otros gases liberados por actividades industriales podría causar la expansión de praderas sobre áreas actualmente ocupadas por bosques de coníferas en el noroeste de los Estados Unidos.

Si del continente pasamos al océano, se ha demostrado que el aporte excesivo de nutrientes a las zonas costeras, provenientes de los desechos urbanos y agrícolas, conlleva un reemplazamiento de comunidades de crecimiento relativamente lento (angiospermas marinas) por otras con mayores tasas de crecimiento (algas).

La conjunción de todos esos resultados apunta hacia un aumento global de la tasa de crecimiento vegetal, lo que liberaría en forma de CO_2 parte del carbono almacenado en materia vegetal y retroalimentaría los efectos sobre la vegetación anteriormente mencionados. Ahora bien, pese a los datos recogidos en diversos ensayos experimentales, el aumento global de la tasa de crecimiento y el consecuente descenso de la reserva vegetal de carbono se mueven todavía en el terreno de la hipótesis. Los estudios que llegan a la conclusión de que se produciría un incremento de la tasa de crecimiento bajo concentraciones atmosféricas de CO_2 elevadas se han realizado con unas condiciones experimentales particulares y son difícilmente extrapolables al ecosistema en su globalidad. Sin olvidar que las altas concentraciones de CO_2 pueden alterar la tasa de descomposición del material detrítico vegetal, invalidando la asociación entre la tasa de crecimiento vegetal y la capacidad de almacenar carbono.

Nos queda aún mucho por conocer antes de poder determinar el control del almacenamiento de carbono por parte de la vegetación y predecir, en consecuencia, su papel potencial en el nuevo balance global de carbono. La asociación entre la tasa de crecimiento vegetal y la cantidad de biomasa y material detrítico en los ecosistemas contribuye a ello, al tiempo que pone de relieve la importancia de estudiar las causas de esta asociación para avanzar en esta línea.

JUST CEBRIÁN Y
CARLOS M. DUARTE
Centro de Estudios Avanzados
de Blanes (Gerona)

Nuevos materiales

Métodos combinatoriales

En el campo de los nuevos materiales existe un universo de compuestos por descubrir. No hace mucho tiempo que las únicas formas que conocíamos del carbono eran el grafito de nuestros lápices, el preciado diamante y carbón negro común sin una estructura definida. A principios de esta década, de una manera fortuita, se descubrió una nueva manifestación de dicho elemento: el carbono 60 y miembros de la familia de fullerenos. Hasta ahora, el descubrimiento de nuevos materiales ha sido teóricamente impredecible y experimentalmente sujeto al método de prueba y error. Es obvia la necesidad de un método más práctico y eficaz para explorar la infinidad de posibilidades que ofrece la variedad de elementos químicos del universo.

Recientemente, científicos del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley y de la Universidad de California en Berkeley han concebido y llevado a la práctica una nueva estrategia que aplica las ventajas de la química combinatorial —la síntesis y muestreo de colecciones muy grandes, o matrices, de distintas entidades moleculares— a la síntesis de materiales de estado sólido nuevos.

La química combinatorial venía usándose para sintetizar, separar e identificar biomoléculas y moléculas orgánicas pequeñas, con utilidad potencial debido a su bioactividad o sus propiedades catalíticas. Sin embargo, no se había recurrido a ninguna estrategia combinatorial para descubrir materiales de estado sólido con nuevas propiedades físicas o químicas.

Xiao-Dong Xiang, físico del Laboratorio Lawrence, Peter G. Schultz, químico de la Universidad

de California en Berkeley, y colaboradores han extendido la técnica combinatorial de moléculas biológicas y orgánicas al resto de la tabla periódica. La técnica consiste en la deposición de películas delgadas a través de una secuencia de máscaras sobre un substrato conveniente para sintetizar matrices de materiales de estado sólido. Subsecuentemente, la matriz se somete a altas temperaturas para que las películas se difundan y reaccionen entre sí. Las propiedades de los materiales obtenidos se estudian por medio de contactos eléctricos u otros métodos rápidos de caracterización con el fin de identificar los materiales de posible aplicación.

Para comprobar la viabilidad de la técnica, Xiang, Schultz y colaboradores crearon matrices de muestras con diferente composición química y secuencia de deposición de películas. Los materiales que se depositaron fueron carbonatos u óxidos de bario, bismuto, calcio, estroncio, cobre, plomo e ytrio sobre substratos de óxido de magnesio. Matrices con densidades de hasta 1500 muestras por centímetro cuadrado fueron depositadas y calcinadas entre 700 grados C y 900 grados C. En estas matrices se identificaron varios superconductores de alta temperatura cuya naturaleza se conocía de antemano.

Esta técnica combinatorial ya ha empezado a dar frutos en el descubrimiento de nuevos materiales. En experimentos más recientes, realizados por el mismo grupo y encaminados a obtener materiales con magnetoresistividad intrínseca, se identificó y caracterizó una nueva familia que contenía lantano, calcio, estroncio, bario, cobalto y oxígeno.

Este descubrimiento confirma la opinión de Schultz de que "la comunidad científica ha hecho millones de compuestos que contienen hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, pero no se ha dedicado igual empeño al resto de la tabla periódica. Pienso que hay una gran cantidad de materiales que no se han descubierto debido a la falta de un buen método sistemático, tanto teórico como experimental, para encontrarlos". La idea subyacente a esta técnica es de aplicación general y se han abierto nuevas vías de síntesis de catalizadores, materiales fosforescentes, ferritas y otros. También se proyecta sintetizar las matrices bajo diferentes presiones, atmósferas y gradientes de temperatura.

GABRIEL BRICEÑO
División de Ciencias de Materiales
Laboratorio Nacional Lawrence
en Berkeley



Una matriz de 128 muestras de superconductores de alta temperatura antes de ser calcinada. Esta matriz contiene diferentes carbonatos u óxidos de bario, bismuto, calcio, estroncio, cobre y plomo que se depositaron en distintas proporciones y secuencias sobre un monocristal de óxido de magnesio. Cada muestra refleja su color original cuando se le deja expuesto a luz blanca, de acuerdo con su composición. El tamaño de las muestras es aproximadamente 1 mm × 2mm × 2000 angstroms

Enfermedades infecciosas

¿Vuelve el paludismo?

Cada año mueren por paludismo de 1 a 2 millones de niños antes de cumplir los 5 años. Esa infección es, junto con las enfermedades diarreicas, las enfermedades respiratorias agudas, la tuberculosis y el sarampión, una de las afecciones que causa mayor mortalidad.

El paludismo o malaria es una enfermedad producida por cuatro especies de esporozoos del género *Plasmodium: P. vivax, P. ovale, P. malariae* y *P. falciparum*. Cada especie presenta unas características morfológicas y biológicas distintas y produce enfermedades diferentes, tanto desde el punto de vista clínico y epidemiológico, como en lo referente a las pautas terapéuticas y profilácticas recomendadas.

El ciclo de desarrollo de los plasmodios causantes del paludismo humano es complejo. Requiere un huésped invertebrado (el mosquito *Anopheles*), donde ocurre una multiplicación sexuada, un huésped vertebrado (el hombre). En el hígado de éste se desarrolla un ciclo de multiplicación asexuada por esquizogonia —división múltiple—, que no produce síntomas (ciclo preeritrocítico), seguido de un ciclo de multiplicación asexuada por esquizogonia en el interior de los eritrocitos (ciclo eritrocítico), responsable de los síntomas. En *P. vivax* y *P. ovale* quedan formas persistentes en el hígado (hipnozoitos), asintomáticas, que causan las recidivas.

Hasta la década de los cincuenta, el paludismo se extendía desde el ecuador hasta zonas de clima frío. Gracias a las campañas de lucha llevadas a cabo bajo los auspicios de la Organización Mundial de la Salud, el paludismo se erradicó de muchas de estas regiones. Con todo, en aquellos países donde el impacto que producía sobre la población era menor se consiguió su control, pero en los que provocaba mayores estragos la situación no se modificó.

El paludismo se halla ahora confinado a los países tropicales, aunque con una incidencia desigual. Se supone que hay de 300 a 500 millones de infectados. De ellos, más del 90 % vive en el Africa subsahariana, el continente palúdico por excelencia. En Asia lo padecen de 12 a 15 millones de peronas, y en América tropical de 2,2 a 5,6 millones.

La distribución geográfica de las diferentes especies de plasmodios no es homogénea. *P. falciparum*, agente causal del paludismo maligno y de capacidad letal, predomina en Africa subsahariana y ciertas zonas de América del sur y sudeste asiático. *P. vivax* presenta la distribución más amplia, y en algunos países de Asia y América es la especie predominante; apenas se da en Africa occidental, debido a que los habitantes de esa región son resistentes a esa especie de plasmodio, ya que sus hematíes carecen de la proteína que actúa de receptor de los merozoitos y que está relacionada con el grupo sanguíneo Duffy. Ni *P. ovale* ni *P. malariae* alcanzan el interés de las precedentes.

En condiciones naturales, el paludismo se transmite por la picadura de hembras de mosquitos del género *Anopheles*, del que existen 400 especies, aunque sólo unas 60 son vectores del esporozoo. En cada región, hay sólo 3-4 especies que revisten importancia. También es posible la transmisión por la sangre (paludismo transfusional, por jeringuillas) y materno-fetal (paludismo congénito).

Con cierta frecuencia se diagnostican casos de paludismo fuera de sus fronteras naturales (paludismo importado). Cada año se declaran unos 200 casos de paludismo importado en España y unos 8000 en Europa, aunque estas cifras se consideran inferiores a las reales. El paludismo importado puede transmitirse en el nuevo país por mosquitos locales, lo que da lugar al paludismo introducido. Este fenómeno está relacionado con la *vulnerabilidad* (que depende de su proximidad a zonas palúdicas y de la entrada de plasmodios por el influjo de personas o de anofelinos) y con la *receptividad* (que depende de la abundancia de anofelinos con capacidad vectorial y de factores ecológicos y climatológicos). Ambos factores definen el *riesgo paludógeno* de una zona. En España, la investigación entomológica ha demostrado que la densidad de *Anopheles atroparvus* en algunas zonas es idéntica a la que había antes de la erradicación de la enfermedad, pero estos mosquitos no son receptivos para *P. falciparum* de Africa, aunque sí lo son para *P. vivax*.

En los últimos años, la situación del paludismo ha empeorado en el mundo. En la India se declararon en 1961 un total de 50.000 casos. Quince años más tarde se registraron 6,4 millones y, en 1992, 2 millones. No es raro que las alteraciones meteorológicas locales desencadenen graves epidemias, como la de 1988 en Madagascar, que produjo la muerte de unas 25.000 personas. Este empeoramiento de la situación del paludismo se debe a varios factores. Por un lado, *P. falciparum* ha adquirido resistencia contra los antipalúdicos, y, por otro, los vectores también se han hecho resistentes a los insecticidas. Sin embargo, los factores que más influencia han tenido son el deterioro social y económico, así como las guerras y desórdenes políticos de los países del Tercer Mundo con paludismo endémico, que impiden llevar a cabo campañas de control.

Parasitación grave por Plasmodium falciparum. *Obsérvese la presencia de numerosos trofozoitos, en forma de anillo, intraeritrocitario*

Existe la preocupación de que los cambios climáticos actuales favorezcan la extensión del paludismo hacia zonas hasta ahora exentas. Para desarrollarse en el vector, el esporozoo necesita una temperatura media superior a 16 grados C (temperatura ideal entre 20 ºC y 30 ºC) y una humedad del 60 %. El aumento de la temperatura de la Tierra puede dar lugar a que algunas regiones donde las condiciones climáticas actuales no son propicias para el desarrollo de los plasmodios, se tornen receptivas. Sin embargo, el aumento de la temperatura media se acompaña de la extensión de la desertización, y los desiertos no son el hábitat ideal para el paludismo.

Un problema grave de esta enfermedad infecciosa estriba en la resistencia de *P. falciparum* a los antipalúdicos. A principio de los años sesenta se descubrieron casos de menor sensibilidad de esta especie a la cloroquina en la Amazonía y en el sudeste asiático. Resistencia que se propagó por América del Sur y Asia meridional. A comienzos de los ochenta había llegado a Sudán y Kenya, desde donde se irradió por todo el continente africano. Las únicas regiones en las que no se han descrito resistencias son América central, México y Oriente medio, aunque en esas regiones el paludismo falcíparo es muy raro, y en muchas zonas ni siquiera existe. Inicialmente la resistencia se daba sólo frente a la cloroquina, pero se ha ampliado a otros antipalúdicos, como son la asociación sulfadoxina/pirimetamina, mefloquina, halofantrina, e incluso a la quinina, en particular en el sudeste asiático.

En los últimos años, se han intensificado los esfuerzos por encontrar una vacuna. Hay indicios de que una vacuna sintética conocida como SPf66 pueda haber abierto la puerta que nos lleve a ella. Conviene, sin embargo, andar con cautela. Es preciso seguir con estudios controlados que demuestren una eficacia superior a la observada hasta ahora (que en algunos lugares es sólo del 30 % y en otros no alcanza valores significativos), que la eficacia se demuestre en diferentes zonas palúdicas, que la inmunidad persista y que reduzca la mortalidad y los efectos perjudiciales del paludismo crónico, como la anemia.

JOSÉ LUIS BADA AINSA
Depto. de Microbiología
Facultad de Medicina
Universidad Autónoma de Barcelona

Sensor ultrasónico para ciegos

El fuerte desarrollo que están conociendo distintos campos relacionados con las técnicas de la información (microelectrónica, informática, sensores, robótica, etcétera) posibilita su proyección a problemas de muy distinta índole, más allá de los ámbitos que pudieron ser sus motores, como la exploración espacial y la defensa, o sus multiplicadores, como el sector industrial.

El mundo de las personas discapacitadas y de los ancianos presenta un conjunto importante de limitaciones esencialmente perceptivas, de locomoción y manipulación con orígenes orgánicos o de tipo cerebral.

El Instituto de Automática Industrial (IAI), dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, enlazando con su actividad central de investigación sobre robótica, sistemas autónomos y disciplinas afines, decidió abordar el área de las técnicas de rehabilitación e integración de las personas discapacitadas. Desde 1990 el IAI participa en el Proyecto Iberoamericano del programa CYTED "Nuevas Tecnologías de la Información para la Autonomía Personal de los Discapacitados". Dentro de ese marco el IAI ha trabajado en colaboración con otros grupos, sobre todo con la Universidad Pedagógica Nacional de Bogotá y con la Facultad de Medicina de Montevideo. Fruto de ese trabajo conjunto es un sistema detector por ultrasonidos (TREBOL): un dispositivo para ayuda a la orientación y movilidad de los deficientes visuales, que presta asistencia complementaria al bastón tradicional en los desplazamientos de estas personas.

No es el primer esfuerzo en el mundo. Desde hace más de dos décadas se han venido ensayando diferentes sistemas de captación del entorno; se basan en sensores láser y, sobre todo, en técnicas ultrasónicas. El TREBOL se propone, por un lado, solventar algunos problemas ergonómicos y operativos de estos sistemas y, por otro, conseguir un frente de detección de 180 grados, que distinga una zona frontal de desplazamiento y dos laterales para captación de referencias de localización.

El sistema sensor consta de dos unidades: la cabeza sensora, que comprende los transductores de interacción con el medio y que se coloca a la altura del pecho (sujeta sobre la camisa o colgada del cuello), y la unidad electrónica con toda la circuitería que, conectada por un cable con la anterior, puede prenderse del cinturón; ésta incorpora actuadores de tipo táctil o acústico con distintas alternativas de comunicación.

La cabeza sensora está compuesta por tres pares de transductores ultrasónicos de tipo piezoeléctrico, que operan a una frecuencia de 40 kilohertz. Los tres pares están dispuestos angularmente de forma que, actuando sucesivamente en sectores de izquierda, centro y derecha, cubran un frente de detección de 180 grados. En cada pareja existe un emisor, que genera una onda ultrasónica al aplicar sobre él un impulso eléctrico, y un receptor de la misma naturaleza aunque opera de forma inversa. Cuando recibe una onda ultrasónica, como eco de la señal anteriormente generada al ser reflejada por un objeto, el transductor que actúa como receptor convierte la vibración mecánica en señal eléctrica.

La razón de disponer de tres parejas de sensores no es otra que la de poder explorar secuencialmente el frente indicado, teniendo en cuenta que cada pareja actúa en un sector angular, de 70-80 grados los laterales y de 30 grados el central. De este modo, y considerando dos sectores de solapamiento, se dispone de cinco sectores angulares diferenciados. La información que se obtendrá mediante la unidad electrónica, y que se comunicará al deficiente visual, lo será en dos parámetros: ángulo (5 sectores) y distancia, esta última en un rango de 0 a 2 metros y con una variación discreta por zonas determinadas.

La electrónica de pretratamiento (amplificación, filtrado, rectificado y otros) tiene por finalidad conformar la señal eléctrica correspondiente al eco para su procesamiento por el microcomputador monopastilla (tipo 196-Intel) en el que se desarrolla el proceso de digitalización. Esta unidad programable y versátil, auténtico corazón del sistema, tiene asignadas funciones tales como la detección de eco por distintos criterios (umbral dinámico, área, valor de pico), el cálculo del tiempo de tránsito y la conversión a distancia, el control y la gestión de la emisión, el filtrado y la depuración de la información y la generación y codificación de las señales de salida hacia el invidente. La salida de información se ha establecido en una primera configuración por un canal auditivo que utiliza señales elementales moduladas en número de impulsos y frecuencia o tono para indicar las zonas angulares y de distancia en las que se discretiza el entorno. Se ha previsto igualmente incorporar un canal vibrotáctil como vía alternativa.

El paso más difícil, sin duda alguna, es el de depuración de la información. Se trata de generar sólo información útil de un entorno de enorme complejidad topológica, lo mismo en la calle que en casa. Deben, pues, eliminarse falsas alarmas por ecos espurios, distinguir objetos móviles que se alejan, objetos más lejanos frente a otros más próximos, etc. Para todo ello se están desarrollando estrategias adaptativas, que permitan la selección automática de la información, en función de la naturaleza y de la cantidad de los datos de cada situación. En ese sentido se ha previsto, por ejemplo, además de establecer dinámicamente el umbral, hacer también el cambio automático de alcance máximo. Pensemos en la diferencia de información que debe suministrarse para un ambiente de un campo despejado frente a otro de tipo urbano, repleto de objetos fijos (árboles, farolas, paredes) y móviles (peatones, autos).

Tras diversos ensayos de laboratorio, se ha construido un prototipo portátil que lo están evaluando expertos de la ONCE y el equipo de profesores colombianos que colaboran. En ambos casos se trata de analizar la respuesta del sistema en su uso por personas ciegas para la ulterior optimización del sistema. De hecho se ha comenzado ya a realizar modificaciones (cambios de estrategias, ajustes paramétricos), a partir de las primeras observaciones extraídas de las pruebas reales en distintos tipos de entornos.

La fiabilidad del dispositivo final junto a otras consideraciones de tipo ergonómico, e incluso su coste, determinarán el grado de aceptación por parte de los usuarios, lo que evidentemente habrá que evaluar antes de su introducción en el mercado.

RAMÓN CERES RUIZ
Instituto de Automática Industrial
(C.S.I.C.) Madrid

Shawn Carlson

Medición del viento con metal caliente

¿Hasta qué punto logra el nido reducir el aire frío de una tormenta de invierno? ¿Cuán intensa debe hacerse una brisa para obligar a una hormiga cortadora a aferrarse más a las hojas? A estas y otras preguntas daremos respuesta si somos capaces de medir las exiguas velocidades de viento de espacios cerrados. Por desgracia, los anemómetros que emplean aspas hemisféricas montadas en un árbol vertical son de manejo difícil y muchos de ellos valen sólo para medir velocidades superiores a unos cinco metros por segundo. Para velocidades del viento más bajas es mejor recurrir a la anemometría térmica, que se basa en el efecto enfriador del aire en movimiento sobre un trozo de metal caliente.

Los anemómetros térmicos profesionales funcionan merced a diminutos cables al rojo y miden velocidades del aire del orden de un millón de veces por segundo. Pero estos sistemas son caros y los cables se rompen con facilidad. Más económico resulta el procedimiento que vamos a describir, fundado en dos bolitas metálicas y algunos componentes electrónicos baratos. Una de las bolas se calienta con una corriente eléctrica que atraviesa una resistencia. La diferencia de temperatura entre las bolas indica la velocidad del viento con un error inferior a pocas unidades por ciento y el dispositivo funciona hasta en un tarro de mantequilla.

Con bolas de aluminio de 12 mm de diámetro se consiguen unos anemómetros óptimos. El aluminio conduce el calor mucho mejor que el acero y el bronce; además, no es tan alterable por agentes atmosféricos como el cobre y el latón. Admite pulido fuerte y refleja bien tanto el espectro visible como el infrarrojo, lo que hace al anemómetro insensible a la luz solar directa.

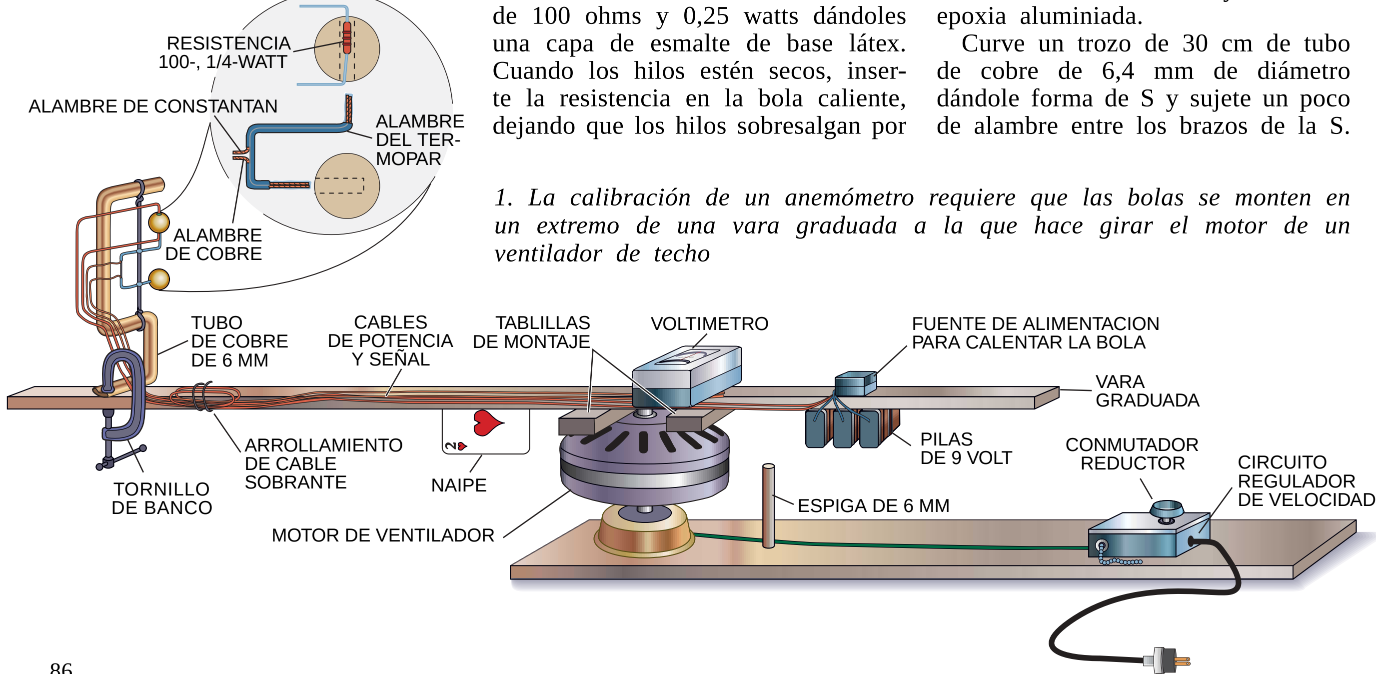
Las bolas hay que protegerlas. El aluminio pulido se araña y los rasguños alterarían las propiedades térmicas de las bolas. Si bien una capa de esmalte blanco las protegería, también las aislaría un poco y haría que reaccionaran con más inercia a los cambios en la velocidad del viento. Es preferible chapar en oro las bolas sin pulir, con lo que se obtiene una superficie reflectora y duradera.

Prepare las bolas practicando en ellas orificios de 2,4 mm de diámetro; una de ellas taládrela de un lado a otro (la que será la bola caliente) y la otra sólo hasta 9,5 mm. Aísle eléctricamente los hilos de una resistencia de 100 ohms y 0,25 watts dándoles una capa de esmalte de base látex. Cuando los hilos estén secos, inserte la resistencia en la bola caliente, dejando que los hilos sobresalgan por cada extremo. Pegue en su sitio la resistencia con un toque de epoxia aluminiada de baja viscosidad; conseguirá así un buen contacto entre la bola y la resistencia.

Para calentar la resistencia, emplee un circuito integrado 7805, con lo que le aplicará cinco volts. El microcircuito puede alimentarlo con cualquier tensión continua comprendida entre cinco y 35 volts. Este circuito consume una batería alcalina de nueve volts en unas cinco horas, por lo que considere emplear un adaptador o unas baterías de linterna mayores. Conecte un sumidero de calor al respaldo del microcircuito; yo usé una pizca de epoxia aluminiada.

La diferencia de temperatura entre las bolas se mide con un termopar, que consta de dos alambres conductores eléctricos, hechos de metales distintos, unidos entre sí. Los termopares habituales son los de cobre y constantán, alambres de los que necesitará unos 10 cm. Quite un centímetro, más o menos, de aislante de cada extremo de cada alambre y una ambos alambres retorciéndolos para formar dos uniones. Sumérjalas en esmalte. Corte el alambre de cobre por el centro y estañosuelde los cabos a sendos alambres de cobre distintos. Inserte una unión en cada bola y selle con epoxia aluminiada.

Curve un trozo de 30 cm de tubo de cobre de 6,4 mm de diámetro dándole forma de S y sujete un poco de alambre entre los brazos de la S.



1. La calibración de un anemómetro requiere que las bolas se monten en un extremo de una vara graduada a la que hace girar el motor de un ventilador de techo

Sobre el alambre rígido monte las bolas separadas algunos centímetros (*figura 1*). La señal de tensión procedente del anemómetro se intensifica con un amplificador operacional (tipo 741) y se lee en un voltímetro digital. Con estos componentes se detectan velocidades de viento de hasta 0,1 metro por segundo.

Para calibrar el anemómetro, tendrá que medirse la tensión de salida para varias velocidades de viento conocidas. Un procedimiento sería comparar las lecturas con las de un anemómetro de aspas hemisféricas. Pero ello sólo nos daría una precisión suficiente para velocidades superiores a unos cinco metros por segundo, habida cuenta de la insensibilidad de los anemómetros de aspas hemisféricas. Podría extrapolarse a velocidades inferiores, pero tal predicción sería posiblemente incorrecta a causa de que, para vientos lentos, varía la rapidez a la que se enfría la bola caliente.

Un procedimiento de calibración más exacto consiste en hacer pasar corrientes de aire de velocidades conocidas por encima del dispositivo; más concretamente, en colocar el instrumento en una plataforma rotatoria. Podemos valernos de un motor canibalizado de un antiguo ventilador de techo, que resulta ideal porque posee una base desmontable y un control de velocidad; además, rota despacio (a unas cinco revoluciones por segundo) y sin peligro.

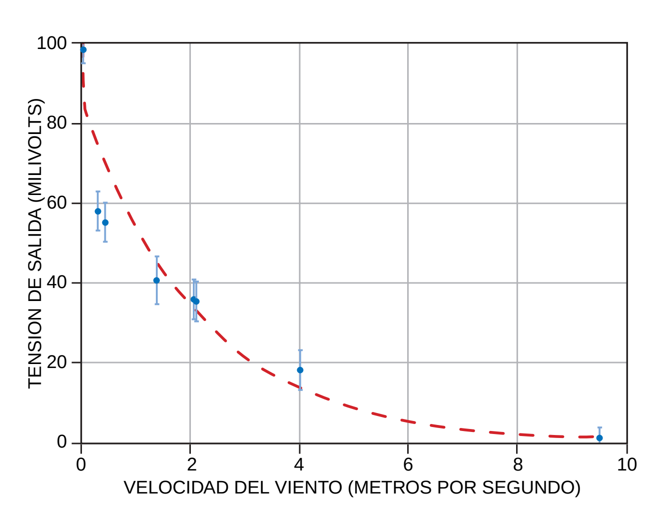
Pero los mandos de un ventilador de techo están en el costado que no conviene a nuestros fines. Habrá, pues, que conectar los conmutadores al respaldo del motor y extender los cables. Un error en esta operación puede provocar sacudida eléctrica, así que encomiende el trabajo a un electricista profesional. Pídale también que instale el circuito regulador de velocidad dentro de una caja metálica y, para conseguir un ajuste fino, que coloque un conmutador reductor.

Monte una vara graduada sobre la carcasa del motor. Con un tornillo de banco sujete el anemómetro a un extremo de la vara y, en el otro extremo de ésta, instale toda la electrónica. Yo sujeté el voltímetro con conductos portacables justo al lado del centro del motor y lo leía mientras giraba. Esto resulta fácil a bajas velocidades, pero se complica a cinco vueltas por segundo. A altas velocidades necesitará una luz estroboscópica.

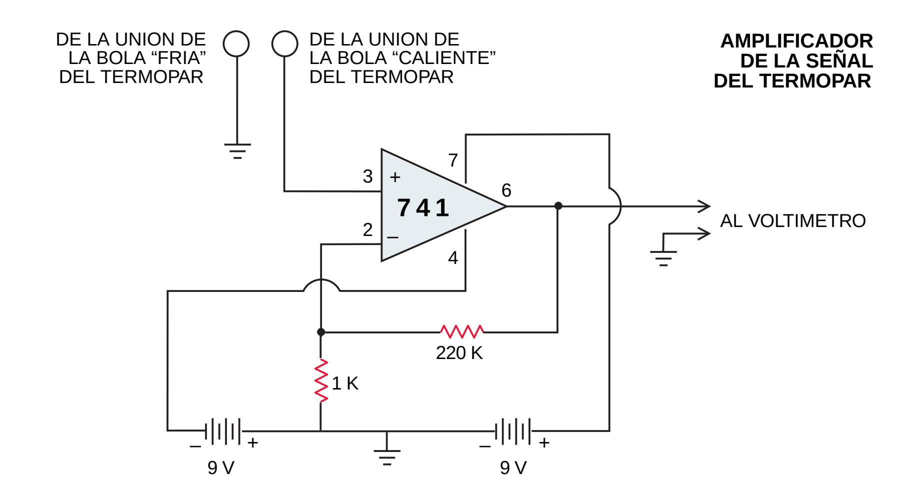
Cuando el anemómetro rota, su velocidad (o en el mismo caso, la velocidad del aire que pasa por encima) es el perímetro del trayecto circular multiplicado por la frecuencia de rotación, en ciclos por segundo. Es decir, la velocidad vale $2\pi Rf$, donde R es la distancia del centro de motor al anemómetro y f es la frecuencia. La frecuencia de rotación se mide con un naipe grapado al costado inferior del brazo. Monte una espiga corta de tal modo que la carta la golpee a cada vuelta, produciendo un sonido seco. Cuente el número de clacs a lo largo de un intervalo; la frecuencia será ese número dividido por el tiempo del intervalo. Seleccionando la posición del anemómetro sobre el brazo y la velocidad de rotación del motor, creé velocidades de viento comprendidas entre 0,1 y 22 metros por segundo.

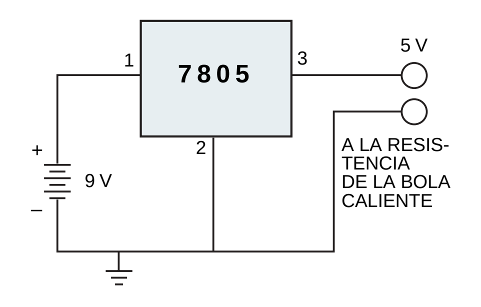
Las calibraciones hágalas todas en una habitación cerrada. Tapone bien puertas y ventanas y no se pasee ni se mueva durante las pruebas. El dispositivo es algo sensible a la temperatura ambiente, de modo que asegúrese de hacer las calibraciones tanto durante una mañana fría como durante una tarde cálida. Después, no deje de anotar la temperatura del aire siempre que trabaje.

Una vez calibrado el anemómetro, puede estudiarse la sutil interacción entre numerosos animales y sus entornos o medir corrientes de aire en cualquier lugar del interior de un edificio, cueva o máquina de gran tamaño. Los aficionados que documentan esos tipos de "microclimas" figuran hombro a hombro junto a los profesionales, porque alcanzan pareja precisión en su trabajo.



2. Los datos de calibración revelan una relación exponencial entre la tensión de salida y la velocidad del viento





3. Unos sencillos circuitos calientan la bola y amplifican la señal del termopar, la cual es leída por un voltímetro

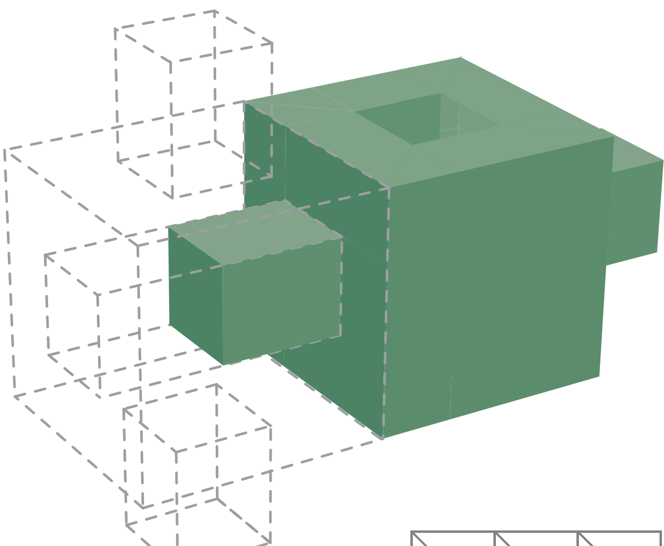
Juegos matemáticos

Ian Stewart

De cómo rellenar el espacio con nudos

Las figuras que pavimentan el plano —figuras que lo llenan por completo sin traslaparse en ningún momento— son tema reiterativo en matemática recreativa. También los cuerpos sólidos capaces de “rellenar” el espacio tridimensional han merecido mucha atención; tanto así, que resulta difícil creer que todavía queden cuestiones pendientes sobre estos objetos. Pero las hay, como se encargó de hacerme saber el *Mathematical Intelligencer* de la primavera pasada. En ese número, Colin C. Adams, del Colegio Williams, describió nuevos métodos propios para construir intrincadas “teselas” tridimensionales a partir de reproducciones de una misma figura o, por así decirlo, de una “prototesela”.

En el más sencillo de los rellenados tridimensionales la prototesela es el cubo. Después de todo, los cubos apilados rellenan el espacio como si éste fuera un tablero de ajedrez. Este ejemplo del retículo cúbico puede parecer trivial, pero, como se verá, mediante una serie de modificaciones elementales pueden crearse teselas increíblemente complejas. Dichas modificaciones se atienen a las reglas de la topología —la “geometría de una lámina elástica”, como a veces se la denomina. Dicho sea con mayor rigor, la topología estudia aquellas propiedades de las figuras que se conservan invariables cuando a éstas se las estira, aplasta, dobla, retuerce y, en general, deforma sin cortarlas o desgarrarlas. Las deformaciones mencionadas se llaman equivalencias topológicas. Un cubo, por ejemplo, es topológicamente equivalente a una esfera, pues podemos convertirlo en ésta por aplastamiento de sus vértices y aristas.

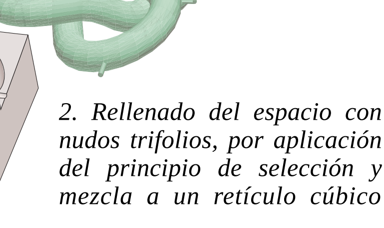


1. *Un bloque tórico puede rellenar el espacio. Para formar una pavimentación bidimensional se toma una pavimentación por cuadrados, se subdivide cada uno y se recombinan las piezas*

Entre los objetos predilectos de los topólogos está el toro, cuerpo que se asemeja a una rosquilla. Para nuestros fines, conviene pensar en el toro macizo o, si se quiere, en la masa de la rosquilla y no sólo en su azucarada superficie. ¿Qué clase de prototeselas son las topológicamente equivalentes a un toro? Una solución posible consiste en un cubo perforado de lado a lado por un túnel de sección cuadrada. El cuerpo obtenido es equivalente a un toro, pero no sirve para rellenar el espacio. Así pues, cortemos por la mitad la espiga prismática extraída del cubo, y coloquemos los dos “tacos” rectangulares en el centro de caras opuestas. Esta figura sigue siendo equivalente a un toro: si la modelásemos con plastilina, podríamos aplastar los tacos y redondear los vértices y aristas hasta producir el toro tradicional.

Si construyésemos con madera unas cuantas de estas prototeselas podríamos machihembrarlas, insertando el taco prominente de una de ellas en el túnel de otra, creando así un estrato plano de un cubo de espesor; apilando tales estratos llenaríamos el espacio. Este ejemplo sirve para ilustrar el principio de selección y mezcla, que podemos comprender más fácilmente en dos dimensiones. Se parte de una pavimentación elemental, por ejemplo, con cuadrados. Se subdivide cada loseta en varias piezas, utilizando la misma subdivisión en cada loseta. Ahora se ensambla una protoloseta nueva eligiendo una copia de cada pieza, no necesariamente perteneciente al cuadrado original. La pieza obtenida sirve, automáticamente, para pavimentar el plano. En nuestro ejemplo tridimensional el cubo se subdividió en tres piezas.

La estrategia de selección y mezcla puede producir teselas todavía más exóticas, conocidas como cubos perforados. Para formar uno basta, sencillamente, perforar varios túneles en un cubo, empezando siempre en la cara superior y terminando en la cara inferior. Estos túneles pueden enroscarse unos alrededor de otros, for-

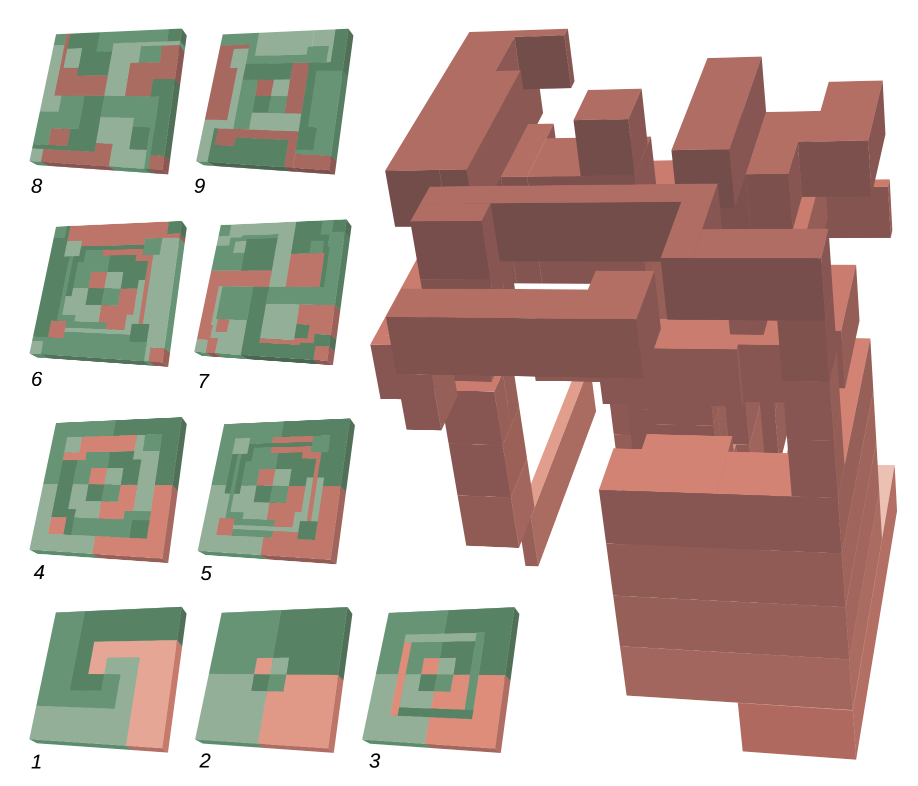


2. *Rellenado del espacio con nudos trifolios, por aplicación del principio de selección y mezcla a un retículo cúbico*

mar bucles anudados y, en general, entrelazarse de manera complicada. Y puede modificarse cualquier cubo perforado hasta generar una prototesela topológicamente equivalente: basta añadir tacos a las caras derecha e izquierda del cubo correspondiente a los semitúneles apropiados. Tales prototeselas pueden luego acoplarse.

Además, la adición de tacos no cambia la topología del perforado original, ya que es lícito imaginar que cada taco se ha extraído por estiramiento de la cara a la que está ligado. Este hecho se denominará principio de proliferación; a saber: una figura conserva su misma topología si emite varios renuevos. Hay, empero, una restricción importante: no deben formarse nuevos agujeros en las protuberancias ni se han de producir figuras nuevas ligándolas a más de una cara. Para ser precisos, las protuberancias deben ser topológicamente equivalentes a cubos.

Adams examina muchas configuraciones interesantes valiéndose de otra sagaz técnica. La ilustraré valiéndome de un toro macizo anudado en trifolio simple, pero un método similar vale para nudos cualesquiera. La idea básica consiste en imaginar de qué forma podríamos fundir en bronce un trifolio utilizando un molde cuyas piezas, que ensamblan perfectamente, engendren un cubo. Se aplica después el principio de selección y mezcla. Para conservar la topología del nudo, resulta que las piezas del molde han de ser cubos topológicos.



3. El nudo (a la derecha) *se formó apilando las capas* (izquierda) *y acoplándoles las piezas marrones. Cuatro de estos nudos encajan perfectamente entre sí y forman un cubo macizo*

Dos de las piezas de este molde son semicubos con una serie de estrías y tallas en una de sus caras; la tercera es una extraña estructura dendrítica. Esta especie de árbol está destinado a encajar entre las regiones traslapadas del nudo y convertirlo en un toro multiperforado. Situado el árbol en su lugar, las hebras del nudo forman bucles al arrollarse unas alrededor de otras, en vez de intersecarse sin más. El árbol está constituido por tres parches de aspecto cuadrado, conectados por tubos delgados, con lo que para completar el molde solamente se necesita una pieza más,

Acuse de recibo

La correspondencia de este mes tuvo su origen en el artículo titulado “Lo último sobre partículas fórmicas”, aparecido en septiembre de 1994. El tema de aquella sección era la hormiga de Langton, entidad matemática cuya morada son las casillas de un cuadriculado infinito, por el que se mueve de acá para allá pintando las celdillas de blanco o de negro, de acuerdo con ciertas reglas simples. Una de mis fuentes atribuyó equivocadamente diversos resultados a ciertas personas, errores que yo reproduje servilmente. Ante todo, he de aclarar que aunque fue Christopher Langton, del Instituto Santa Fe, quien introdujo la primera hormiga, la que yo describía se debe a Greg Turk, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. Las autopistas que dichas hormigas crean fueron descubiertas por Langton, pero fue Jim Propp, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, quien les dio nombre.

El resultado que denominé Teorema de Cohen-Kong fue demostrado en primer lugar por Leonid A. Bunimovich, del Instituto de Tecnología de Georgia, y por Serge E. Troubetzkoy, de la Universidad de Bielefeld. Bernd Rümmer, de la Universidad de Göttingen, ha resuelto ahora uno de los grandes misterios de la mirmecología relativos a las “hormigas generalizadas”, también llamadas “turmitas” en honor a Turk, su inventor. Bunimovich y Troubetzkoy expusieron independientemente la misma idea. Las turmitas obedecen a reglas más complejas que las hormigas y van pintando las casillas de multitud de colores. Sus reglas están definidas por secuencias de ceros y unos. En experimentos computarizados, ciertas secuencias-regla, como la 1001 y la 1100, conducen repetidamente a configuraciones simétricas; el problema consiste en demostrar que la simetría se produce infinitas veces.

Rümmler dio con la idea clave en 1990, que pasa por decorar el cuadrado con curvas conocidas por teselas de Truchet. Inicialmente se valió de las propiedades de estas teselas para explicar las trayectorias simétricas de la secuencia-regla 1100, pero, como se percató, la misma técnica tiene aplicación más general.

A causa del volumen de la correspondencia de “Acuse de recibo”, lamento no poder responder individualmente a muchas cartas, pero, por favor, no por ello dejen de enviarlas.

no tres. Adviértase que esta única pieza es topológicamente equivalente a un cubo.

Las piezas superior e inferior del molde encajan entre sí, formando un cubo típico de caras cuadradas, al que únicamente le falta una región interior, correspondiente al nudo y al árbol. El tronco del árbol se prolonga hasta la arista del cubo. ¿Por qué introducir la complejidad extra del árbol? La razón es que no es posible colar un nudo trifolio a partir de un molde de dos piezas, si tales piezas han de ser topológicamente equivalentes a cubos (las piezas habrían de tener algún tipo de bucle para separar las regiones traslapadas del nudo). El árbol permite colar el nudo mediante moldes equivalentes a un cubo.

Una vez construidas las tres piezas del molde se puede aplicar el principio de selección y mezcla para crear prototeselas muy curiosas [*figura 2*]. Se empieza con un reticulado cúbico, cuyos cubos son escindidos en cuatro piezas, a saber, un trifolio más las tres piezas de su molde. Imaginemos rellenado el espacio con tales cubos, dispuestos en un retículo cúbico. Se elige seguidamente un ejemplar de cada pieza: el nodo de un cubo, el semicubo superior del que está detrás de él, el semicubo inferior del que tiene delante y el árbol perteneciente al de su izquierda. Es preciso tallar también algunos surcos y añadir tubos a juego, como se muestra, de forma que las piezas encajen en una única prototesela, bastante compleja. A pesar de su arquitectura, esta prototesela es, de acuerdo con el principio de proliferación, equivalente al nudo trifolio original, pues está formada añadiendo tres protuberancias al nudo trifolio, las cuales, a pesar de la complejidad de sus formas, son topológicamente equivalentes a cubos.

Este método lleva a formas bastante complejas, y sería perdonable que el lector desease figuras de aspecto más similar al de un tubo ordinario anudado. Pero Adams también tiene respuesta para eso: empieza con un cubo y lo descompone en piezas anudadas congruentes. La figura 3 muestra una de tales descomposiciones en cuatro nudos trifolios simétricamente relacionados. Si partimos de un retículo cúbico y descomponemos cada cubo en cuatro nudos trifolios, de la forma mostrada, habremos rellenado el espacio con nudos. ¿Hallará el lector una solución más sencilla?

Carlos Perelló, Luis Alonso y Carlos Pajares

Euler

En castellano

Método de máximos y mínimos, por Leonhard Euler. Universidad Autonóma de Barcelona-Universidad Politécnica de Cataluña; Barcelona, 1995.

Hace varios años que la Universidad Autónoma de Barcelona se propuso la publicación de traducciones y comentarios de obras clásicas de la ciencia que, por una parte, no estuviesen ya traducidas y, por otra, fuesen de interés general. Los textos habrían de ayudar a difundir y aclarar algunas de las ideas conductoras de la ciencia actual. Para ello, las obras escogidas habrían de ser autocontenidas, inteligibles y precursoras. El *Methodus* de Euler satisface tales requisitos.

Los métodos del cálculo infinitesimal, puestos a punto al final del siglo XVII, permitieron abordar un conjunto de problemas que se habían resistido al tratamiento matemático. Emblemático entre ellos es el de la braquistocrona, que Johann Bernoulli propuso en 1696. Se trata de hallar la forma que ha de tener una rampa para minimizar el tiempo de caída, entre dos puntos dados, de una masa puntual que se deslice sobre ella. El problema florece y llega a fructificar en toda una problemática con métodos propios, que constituirá el llamado "cálculo de variaciones". El objeto de este cálculo es hallar funciones (léase también curvas o formas) que minimicen o maximicen una cantidad dependiente de esa función.

Al principio, los problemas no dieron lugar a ninguna metodología. Había, eso sí, una idea central, empleada ya por Jakob Bernoulli, o quizás antes por Newton, para dar la forma de una bala que minimice la resistencia ejercida por el aire a su movimiento. Esta idea consiste en aprovechar el hecho de que, si se varía ligeramente la forma correspondiente a la solución del problema, o sea, la función maximizadora o minimizadora, entonces la pequeñez del cambio en la cantidad que se trata de maximizar o minimizar es de un orden superior. Es decir, si la función cambia, la cantidad en cuestión no lo hace en proporción a ese cambio, sino a una potencia superior del mismo.

Euler mantiene vivo el interés por el problema de la braquistocrona, y entre 1732 y 1743 elabora lo que constituirá el primer tratado metódico sobre el cálculo de variaciones, publicado en 1744 bajo el título *Methodus inveniendi lineas curvas maxime minimive proprietate gaudentes, etc*. De esta obra, aparte de su original latino, existe una traducción alemana parcial y una traducción inglesa del "Additamentum I". La selección y traducción al castellano del *Methodus*, que aquí reseñamos, ha sido realizada por Albert Dou. La selección de Dou no difiere mucho de la alemana. A ella añade el "Additamentum II". La selección, obligada por la extensión desmesurada de la obra original para la norma de la colección, recoge un discurso suficientemente unitario, centrado sobre los problemas isoperimétricos, que ilustra los métodos del cálculo de variaciones, y permite el tratamiento de las curvas elásticas en el Additamentum I.

De los seis capítulos originales se han traducido, total o parcialmente, tres: el primero, en el que se crea el marco dentro del cual se enuncia el principio fundamental; el segundo, en el que se consideran curvas dadas por funciones incógnitas definidas en un intervalo, y en el que se trata de maximizar o minimizar la integral sobre el intervalo de una función dada que depende de la función incógnita en el intervalo y de sus derivadas; en este capítulo se da como condición necesaria el que la función haya de cumplir la "ecuación de Euler". Y, finalmente, el quinto, en el que la curva ha de cumplir una condición complementaria, como puede ser el tener una longitud dada de antemano (de ahí el nombre de "problema isoperimétrico").

Del Additamentum I se incluye la parte estática. En particular se introduce la fórmula que da el límite de las fuerzas que, actuando sobre columnas, no provoquen su pandeo. Es quizás el primer ejemplo en la matemática de un problema de inestabilidad por bifurcación. En el Additamentum II aparece el principio de mínima acción.

La introducción razona el criterio de selección y presenta un estudio crítico de la génesis del *Methodus*. Las notas a pie de página obedecen a un triple patrón: didáctico, histórico y textual. Con el fin de integrar la obra en su desarrollo ulterior, se explica en el apéndice la prolongación del *Methodus* en el concepto de "variación" de Lagrange. Un glosario terminológico, la bibliografía y un índice onomástico ponen el colofón. (C. P.)

Antropología

Monstruos y formas intermedias

The eye of the beholder. Deformity and disability in the Graeco-roman world, por Robert Garland. Duckworth; Londres, 1995.

Signs and portents. Monstruous births from the Middle Ages to the Enlightenment, por Dudley Wilson. Routledge; Londres, 1993.

Le destin du mammouth, por Claudine Cohen. Seuil; París, 1994.

Ape, man, apeman: Changing views since 1600. Dirigido por Raymond Corbey y Bert Theunissen. Leiden University; Leiden, 1995.

Inventing human science. Eighteenth-century domains. Dirigido por Christopher Fox, Roy Porter y Robert Wokler. University of California Press; Berkeley, 1995.

La inmadurez de una ciencia se refleja en sus contornos indefinidos. Avanza a medida que va depurando sus principios, sus métodos y su campo de estudio. Cierto es que ese proceso parece a veces inacabable, como en la antropología, en la que convergen enfoques muy dispares. Con todo, se ha progresado. Hoy sería impensable, y no sólo por razones éticas, el espectáculo de comienzos de siglo, cuando Ota Benga, un pigmeo

“Monstruos” ilustrados en los Libri cronicarum *de Hartmann Schedel, de 1493*



africano, fue mostrado en pública exhibición en el Zoológico del Bronx, cerrado en una jaula que compartía con un chimpancé. Creíase erróneamente que los dientes afilados del pigmeo eran un signo de canibalismo.

Sobre el lento camino hacia el conocimiento del hombre están apareciendo numerosos libros, una breve muestra de los cuales es la selección de cabecera. Desde la óptica del experto en filología clásica, Robert Garland saca a luz, en *The eye of the beholder. Deformity and disability in the Graeco-Roman world*, la reticencia y el rechazo del hombre ante los que considera inferiores en su misma progenie. No encuentran éstos cabida en las obras maestras de la escultura, que presentan una imagen de perfección anatómica que no se correspondía con el tipo medio de la población general, si damos por fiables las referencias a sordomudos, ciegos, tullidos, jorobados, enanos, gigantes y demás que abundan en la tragedia y la poesía, en los anales de historia, en la medicina y en la mitología. Para designar la persona deforme, infrahumana en su opinión, los griegos empleaban el término *teras* y los latinos *monstrum*. Su significado abarcaba también los monstruos mitológicos, como la medusa Gorgona o el cíclope Polifemo.

Aristóteles colocaba a los varones en el pináculo de la jerarquía de los seres y a las mujeres un peldaño inferior, uno que, en sus palabras, representaba la “primera etapa en el camino de la deformidad”. Defendía que sólo en el hombre se hallan los órganos en su posición natural, al tiempo que todas las demás creaturas son enanas comparadas con él. “Hay seres, leemos en el *De generatione animalium*, que no se parecen en nada a otros; los hijos que no se parecen a sus padres son monstruos, y en éstos la naturaleza se ha apartado del tipo genérico.” Esa desviación del tipo genérico comienza en una fecundación anómala.

Para los griegos, los dioses castigaban a los padres con el nacimiento de un niño deficiente. Por eso no dudaban en abandonarlo. Ulises fue uno de esos expósitos de la mitología al que le taladraron los maléolos. En Esparta, donde se privilegiaba la pureza racial y se mantenía un código eugenésico riguroso, el abandono de niños deformes y enfermos era una exigencia legal. Severa se mostraba asímismo Roma. Cuenta Dionisio de Halicarnaso que Rómulo ordenó que todos los habitantes de la ciudad cuidaran de la progenie masculina y de la hija mayor, prohibiendo matarlos con menos de tres años, a no ser que presentaran alguna minusvalía. La cuarta de las Doce Tablas manda que el paterfamilias elimine al deforme. Se tardó siglos en dejar de perseguir a los padres que se atrevían a cuidar de sus hijos deficientes.

En momentos de crisis, ciegos y deformes, lo mismo que otros grupos marginales, incluidos forasteros y etnias minoritarias, se convertían en reos potenciales. En Grecia se institucionalizó la práctica del *pharmakós*, o chivo expiatorio sobre el que recaían las culpas de la comunidad. De ese fin siniestro terminaron por liberarse en Roma, cuando los emperadores se procuraron su compañía, convencidos de que los *monstrua* estaban dotados de poderes supernaturales, capacitados para encantos y sortilegios.

La antigüedad clásica fue fecunda en “monstruosidades” étnicas. Los astomoi, por ejemplo, tenían un agujero en el rostro por boca; los blemyai, sin cabeza, presentaban el rostro en el pecho; los kynokephaloi, raza india de hombres con cabeza de perro, se comunicaban entre sí ladrando. Suponían que esas razas moraban en lugares remotos, allende los límites geográficos conocidos: Escitia, Libia, India y Etiopía. Pero ni griegos ni romanos se atenían a la fisiología como único criterio para medir la semejanza de otras razas con la suya; la imagen del otro era una amalgama de desviaciones fisiológicas, étnicas y conductuales de la norma grecorromana.

Por otro lado, los pueblos de la antigüedad concedieron especial importancia a los individuos de excepcional fortaleza y talla, a quienes se les atribuía buena parte del resultado de las batallas. La acción entera de la *Iliada* se basa en la idea de que la retirada de Aquiles basta para cambiar la fortuna del ejército griego. En el descubrimiento de grandes huesos se apoyó la idea de que la tierra estuvo otrora poblada por héroes o seres superiores. Plinio el Viejo recoge en el séptimo libro de su *Historia Natural* esa tradición racial y la transmite a los siglos posteriores.

Dudley Wilson toma el testigo de Garland en *Signs and Portents. Monstruous Births from the Middle Ages to the Enlightenment*, libro que revela el cambio gradual de actitudes supersticiosas a otras más científicas y médicas sobre los nacimientos monstruosos. Ese tránsito discurre a lo largo de cuatro fases: interpretación de los “monstruos” como aviso divino contra el pecado, curiosidad de gabinete, interés por su peculidad anatómica y nacimiento de la teratología.

San Agustín, y con él los medievales, ve en los monstruos la polimórfica riqueza de la creación. Hasta el Renacimiento lo monstruoso sigue significando lo insólito o anormal. La fantasía que adoba los relatos se plasma en grabados que se reimprimen una y mil veces. Entre los más conocidos figura la compilación de Hartmann Schedel, la *Crónica de Nüremberg*, impresa en 1493, todavía con resonancias plinianas. A lo largo del XVI, los monstruos, es decir, personas que nacen sin extremidades, hermafroditas o siameses, son motivo recurrente de las recriminaciones sobre la lujuria o el pecado contra naturaleza. Prolifera también un género literario de éxito eficaz, una suerte de literatura de cordel llamada *canards* en Francia y *ballads* en Inglaterra. Pero no faltaron los tratados, como el escrito por Ambroise Paré en 1573: *Des monstres tant terrestres que marins, avec leurs portraits*, una de las primeras obras en adoptar una actitud clínica. Paré mezcla razones religiosas con causas mecánicas, cuatro de las cuales se

refieren a la cantidad y calidad del semen, tres a la presión del feto en el útero, una a la imaginación de la madre, una a enfermedad hereditaria o accidente y otra a los que simulan anomalías para ganar dinero.

Las cosas cambian con el siglo. Uno de los primeros acontecimientos en instar un enfoque anatómico más riguroso fue el nacimiento de dos niñas siamesas en París en 1605, que despertó una viva polémica. Aunque tampoco se deja de lado la curiosidad. El propio Aldrovandi llegó a inferir la etimología de "monstruo" de aquello que *se muestra* para admiración. Por su parte, Francis Bacon entiende lo monstruoso como algo producido por la naturaleza con arte: en lo monstruoso e insólito es donde debe estudiarse la normalidad; a partir de lo monstruoso deben inferirse los caracteres naturales.

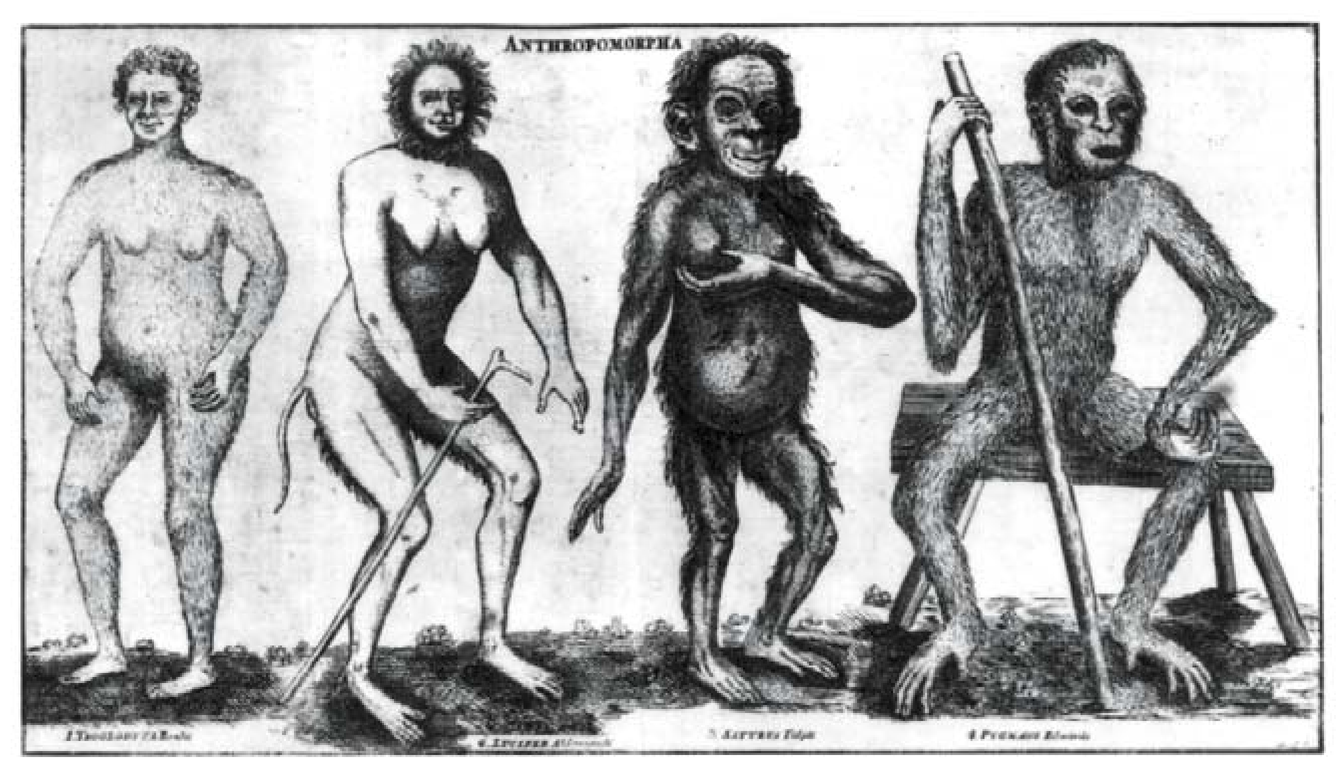
Desde el siglo XVIII, el monstruo se ciñe ya al terreno de la inquisición científica. Debe tomarse por una rareza, un problema médico causado por algún desajuste de las fuerzas de la creación. La Regia Sociedad Londinense trocó el gabinete de curiosidades que los incluía por un muestrario casuístico capaz de hacer progresar la medicina. Las revistas de las instituciones acogen en sus páginas el estudio de "casos monstruosos".

¿Qué había pasado con los "gigantes"? Claudine Cohen retoma la cuestión en *Le destin du mammouth*. Pese al título, no versa sobre un gran mamífero de pesadas defensas en espiral, de cuerpo macizo cubierto de largo pelaje marrón, diferenciado como especie hace unos 400.000 años y extinguido hace unos 10.000. A Cohen le interesan los sistemas de interpretación, las leyendas y fábulas tejidas en torno a los fósiles. Una historia del saber paleontológico forjado al hilo de la consideración de los restos duros y carne congelada de lo que los indígenas siberianos denominaron mammouth y de lo que los naturalistas llamarían, sucesivamente, "piedras figuradas", "huesos de gigante", "licornio fósil", *Elephas primigenius, Mammuthus meridionalis, columbi, imperator...*

En la antigüedad se habían descubierto por todo el Mediterráneo cráneos y dientes fósiles de paquidermos que se supusieron testimonios de la existencia de gigantes mitológicos. San Agustín refiere en *La ciudad de Dios*, un hallazgo corroborador: a orillas de Utica se encontró un molar "humano" enorme (probablemente de un elefante fósil), cuya materia bastaba para formar cien dientes de hombre. Lo atribuyó a un gigante, pues creía, con Plinio, que la naturaleza tendía hacia una reducción de la talla. Para él, antes del Diluvio, vivió una humanidad de talla descomunal y longevidad extraordinaria; a medida que transcurrieron los siglos los hombres fueron empequeñeciéndose y sus vidas acortándose, como si la tierra hubiera perdido vigor. Los héroes homéricos de enorme estatura adquieren así verosimilitud. La adquieren los cíclopes, primeros moradores de Sicilia, cuyos "huesos" aparecían desparramados por sus cavernas. (Pertenecerían a elefantes enanos hoy desaparecidos, cuyos restos abundan en los depósitos cuaternarios de esa isla; la doble cavidad nasal unida podría haberlos confundido con la "örbita única" del cíclope.)

Durante la Edad Media y el Renacimiento, numerosas obras tituladas *Gigantologia* reafirman la creencia. Se apoyan en el esqueleto gigantesco descubierto en Tegea, "seguramente el de Orestes" que señala Herodoto; en el hallado en Creta, con motivo del terremoto, del que da testimonio Plinio. Plutarco habla de la recuperación del esqueleto de Anteo. Bocacio sugiere que los restos de Polifemo quizá fueran los huesos hallados en la gruta de Erice; "correspondían a un hombre de 200 codos" (120 metros).

La tradición de los lapidarios medievales y enciclopedistas renacentistas reunían en un mismo grupo las gemas, los minerales, los restos de seres vivos, conchas, huesos y cuernos. "Fósil, escribe un autor renacentista, es todo lo que se puede extraer del seno de la madre Tierra". En la nomenclatura de Aldrovandi, las designaciones de los diferentes



Los "Antropomorpha" de Emmanuel Hoppius, de 1763

"objetos fósiles" se creaban según la semejanza, añadiendo a la raíz griega la terminación -ites. Así en su *Museum metallicum* cada piedra tiene su nombre, sus propiedades y atributos singulares en función de las semejanzas que porta. Las *ophiomorphites* son piedras en forma de serpiente, la *psetites* en forma de pez, etc.

Esa idea coexistía con una línea más escéptica. Los fósiles no son ni capricho de la naturaleza, ni gigantes antediluvianos. A finales del XV Leonardo da Vinci no admitía que nacieran piedras figuradas en las cumbres de las montañas por influjo de las estrellas. A comienzos del XVI, Fracastoro decía que las conchas fósiles pertenecían a animales que habían vivido tiempo atrás. Y en las postrimerías de esa centuria, Bernard Palissy afirma que huesos y dientes fósiles son restos orgánicos.

Sólo cuando los viajeros relatan las creencias de los habitantes del Gran Norte comienza a inquirirse si los huesos de mamut corresponden a gigantes o licornios, ballenas o elefantes. Pero, ¿qué hacen los elefantes en las zonas heladas del Norte de Europa y América? ¿Los transportaron hasta allí las aguas del Diluvio o se trata de los elefantes de Aníbal que hubieran escapado hacia el Norte? ¿Pertenecían acaso esos huesos a animales todavía desconocidos que vivían escondidos en regiones inexploradas de la Tierra?

Los gigantes se resisten a desaparecer del universo del saber. Vienen nuevos indicios de China y Patagonia. El gigantismo llega hasta España y de su grado de aceptación, y rechazo, da cuenta, por ejemplo la obra de José Torrubia *Aparato para la historia natural española*, publicada en 1754, y vertida parcialmente al alemán por Christoph Gottlieb von Murr, con un prólogo que constituyen un buen resumen de la historia natural española del segundo tercio del XVIII. Contra esas fábulas Cuvier realiza en 1796 la demostración magistral de que se trata de restos de especies "perdidas": en su *Mémoire sur des espèces d'Eléphans, tant vivantes que fossiles*, sostiene la tesis de la desaparición del mamut, y de una historia "catastrofista" de la Tierra, acontecimiento que se repetiría en otras ocasiones. Había nacido la paleontología.

Otra línea que converge en la búsqueda de la identificación de la naturaleza humana era la primatológica, tema abordado en *Ape, Man, Apeman: Changing Views since 1600*. Viviase en el Renacimiento cómodamente con la enseñanza aristotélica, que dividía en tres los primates que habitaban en las regiones fronterizas de las riberas sureñas del Mediterráneo: "pitecos" (monos), "cebus" (macacos) y "cinecéfalos" (babuinos). Por sus dimensiones y por su postura diferían del hombre, lo que reforzaba la adscripción de los mismos al reino animal, pero también con éste compartían rasgos evidentes. Eso, unido a la prohibición secular de disecar cadáveres, determinó muchos errores de anatomía, que no se despejaron hasta los trabajos de Andrés Vesalio.

Con las exploraciones del XVI se multiplicaron las noticias sobre animales exóticos. Andrew Battell, que pasó varios años en Angola, describió en 1613 lo que observó: "dos tipos de monstruos (gorila y chimpancé), que son comunes en los bosques y muy peligrosos". Les llamaban *Pongo* y *Engecko*. El primero presentaba una sorprendente semejanza física con el hombre, aunque no en las facultades intelectuales. "Es muy fornido y su mirada es humana, encima de sus ojos hundidos tiene cejas de largos pelos. Su rostro y sus orejas son lampiñas, lo mismo que sus manos. Su cuerpo está recubierto de pelo." No se le escapaba su marcha bípeda, su organización social, el respeto por los muertos ni su habilidad en construir refugios que le protegieran de la lluvia. Pudo ese ser muy bien el primer encuentro de un europeo con el gorila.

De la misma región del continente africano donde había estado Battell provino la nueva del descubrimiento del sátiro que Nicolaas Tulp dibujó en 1641 en sus *Observationum medicarum*, donde presentaba la primera descripción científica de un antropomorfo de Angola, una criatura con una llamativa semejanza con un chimpancé que se creía que era el "sátiro" de los trópicos. Trece años más tarde, apareció *Historiae naturalis et medicae Indiae orientalis* de Jacob Bontius, donde describía el "ourang-outang". Bontius añadía que, según los nativos de Indonesia, esos monstruos eran producto de la unión entre mujeres lascivas y monos.

En 1698, el anatomista Edward Tyson adquirió el cadáver de "pigmeo" (cría de chimpancé) que murió en Londres poco después de su arribada de Angola. Sorprendido por su semejanza con el hombre, Tyson decidió estudiarla a fondo, y expuso sus resultados en *Orang-Outang, sive Homo sylvestris*. Según Tyson el chimpancé tiene 34 caracteres en común con los otros monos y 48 en común con el hombre. Constituye, pues, el eslabón intermedio entre los simios y el hombre, desde un punto de vista anatómico e incluso, si hemos de creerle, desde la óptica de sus capacidades intelectuales. Como era de esperar, las conclusiones a las que llegaba Tyson fueron larga y apasionadamente discutidas.

El *Systema naturae* de Linneo apuntaló la tendencia al incluir hombre y mono en la misma clase (los *Quadrupedia*, denominada en seguida *Mammalia*) y se les colocó en el mismo orden (los *Anthropomorpha*, luego *Primates*). Se encontraron fronterizos en dos géneros a través de sendas especies: *Homo africanus niger* y *Simia cauda carens* (el chimpancé). En 1758 pensó que el mono más próximo al hombre no era el chimpancé de Tyson, sino el orangután de Bondt. Tan próximos los creyó que los incluyó en el mismo género *Homo*. En las postrimerías de esa centuria Friedrich Blumenbach justificaba, sin embargo, la separación de los humanos del resto de los primates: el esqueleto de aquéllos presentaba rasgos únicos que daban cuenta de su postura erguida, en tanto que la anatomía ósea (de extremidades y pelvis) de los primates explicaba su andar cuadrúpedo. Abundaba en la misma línea Petrus Camper, quien mostró que el orangután carecía de las estructuras necesarias para el habla y la locomoción bípeda. Camper fue el introductor del ángulo facial como medida craniométrica.

De la estructura ósea se pasó al estudio de la anatomía cerebral, que posibilitó la jerarquización de los primates e incluso fue más allá intentando apuntalar la raciología humana. Las vitrinas de los gabinetes de raciología del último tercio del XVIII mostraban cráneos humanos europeos, asiáticos, americanos y africanos; luego de monos, y así hasta llegar al perro, en un afán comparativo de similaridades y disparidades. Las etapas siguientes adquieren un nuevo marco en el seno del transformismo de Lamarck y el evolucionismo de Darwin.

Pero el siglo XVIII hizo todavía mucho más por el progreso de la antropología. Se esfuerzan en demostrarlo los trabajos compilados en *Inventing Human Science. Eighteenth Century*, libro que explora los diversos significados (zoológico, médico, social, lenguaje, etcétera) de la ciencia del hombre en los pensadores del XVIII. La antropología se convirtió en motivo recurrente de especulación. Basta echar una ojeada a los tratados publicados; por citar dos ejemplos,

New Anthropology de Ernst Platner o *New Elements of the Science of Man* de P. J. Barthez. Pero los enfoques iban desde los naturalistas hasta los economicistos de Adam Smith o filosóficos de David Hume. Diríase que, si la filosofía natural de Copérnico a Newton había forjado una ciencia de la naturaleza, los pensadores del XVIII se aprestaron a crear una ciencia del hombre.

Dentro del dominio naturalista compiten dos concepciones distintas, la de Linneo y la de Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon. Si el sueco había asignado al hombre un lugar común en la zoología, Buffon abordaba en la *Historia natural del hombre* las peculiaridades degenerativas de la naturaleza humana. A la medicina comienza a interesarle por qué los niveles de patogenicidad varían de un sitio a otro y de un grupo a otro. Al explorar tales cuestiones, se pretende forjar una ciencia del hombre basada en la observación y experiencia, un estudio de las regularidades biomédicas. También la pedagogía se vería involucrada. Los niños no sólo nacían en un mundo, sino que se moldeaban también por su mundo. En teoría, si pudiera cambiarse el entorno —familiar, social, económico, político y administrativo— podría cambiarse el niño. Ese sentido de maleabilidad del hombre convierte en tópico a lo largo del XVIII. Para el higienista francés Claude-Adrien Helvétius el entorno lo era todo. (L. A.)

Física atómica

Teoría y experimento

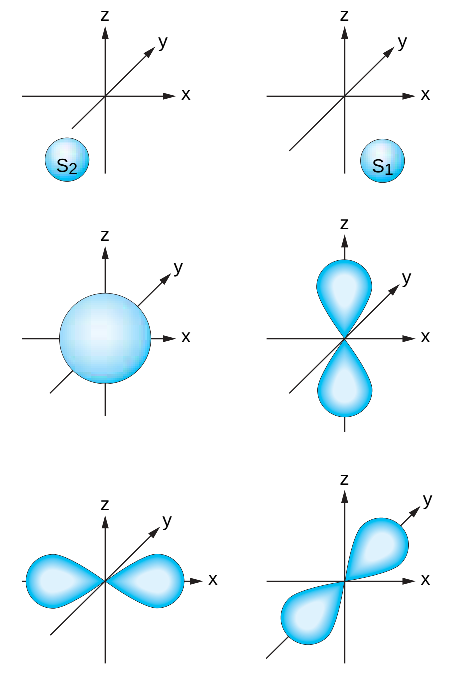
THE PHYSICS OF ATOMS AND QUANTA. INTRODUCTION TO EXPERIMENTS AND THEORY. THIRD CONECTED AND ENLARGED EDICTION. Herman Haken and Hans Christoph Wolf, Springer-Verlag. Berlín, Heidelberg, Nueva York, 1993.

Nos encontramos ante un libro escrito por dos famosos investigadores alemanes en óptica cuántica, el primero teórico y el segundo experimental. Haken además es conocido por aplicar ideas, como la sinergética, nacidas en el dominio de la física a otras ciencias experimentales. Los dos autores están galardonados con importantes premios y medallas por sus significativas contribuciones a la física.

Desde los años veinte en la que la física cuántica adquirió su cuerpo doctrinal, muchos son los libros escritos sobre esta disciplina, empezando por los clásicos de Dirac y de Condon y Morse. La ingente bibliografía hace muy difícil la justificación de otra obra. Sin embargo, ésta tiene un enfoque y tratamiento tal que la hace especialmente atractiva. Más que de un libro de física cuántica en general trata de física atómica.

Los autores hacen un gran esfuerzo de claridad en la exposición utilizando un lenguaje asequible. Como afirman en el prólogo, pretenden que pueda entenderse no sólo por físicos sino también por químicos e ingenieros. De ahí su empeño en temas que revistan interés amplio, como pueden ser los relacionados con enlaces moleculares y espectroscopía. Dentro de ese mismo esfuerzo cabe incluir los 160 problemas incorporados con sus soluciones. Muchos de ellos admiten fácil solución, lo que animará a los alumnos.

El hecho de que los autores usen un lenguaje matemático sencillo no va en detrimento de la exposición de temas que *a priori* pudiesen considerarse no exentos de complejidades conceptuales o que pareciesen imposibles de explicar sin utilizar un complicado aparato matemático. Así, se cuantifica el campo electromagnético, se introduce la renormalización de la masa y se explica el efecto Lamb. Los apartados que encierran cierta dificultad se acotan, para que el lector los salte sin merma de la comprensión del resto del libro.



Funciones de onda de la molécula de agua

Otro aspecto a resaltar es la atención prestada al contenido experimental, complementario del teórico. El lector puede aprender desde diferentes métodos experimentales y sus subsecuentes dispositivos para medir el número de Avogadro, los fundamentos de un espectrómetro de masas, el dispositivo experimental de la dispersión de partículas α, el dispositivo experimental de Franck y Hertz para investigar colisiones entre electrones y átomos, el diseño de un detector de átomos de Rydberg, el experimento Einstein-de Haas para la determinación de cocientes giromagnéticos de muestras macroscópicas, el dispositivo para observar el desplazamiento Lamb, el efecto Zeeman, el efecto Stark, aparato de una resonancia nuclear de espín, dispositivo para realizar espectroscopía de dos fotones y otros muchos aspectos experimentales de fenómenos físicos.

Tras una breve introducción, se desgranan varios capítulos sobre masa y tamaño del átomo, isótopos, núcleo atómico, fotón y electrón. A continuación se introducen los principales postulados de la física cuántica así como simples elementos del aparato matemático utilizado: algunas propiedades básicas de las ondas de materia, modelo de Bohr del átomo de hidrógeno y entramado matemático de la mecánica cuántica. Ya en estos capítulos se vislumbra el principal enfoque de los autores, a saber, física atómica y espectroscopía. Se consagran dos apartados a átomos muónicos y a átomos de Rydberg cuya ubicación en la sección de fundamentos sólo se justifica por el objetivo principal del libro: el estudio de la física atómica. Los capítulos 10 al 19 están dedicados a la física atómica. Empieza por el átomo de hidrógeno y la estructura en capas; continúa con átomos en un campo magnético y en un campo eléctrico, leyes generales de las transiciones ópticas, átomos de muchos electrones, espectro de rayos X y estructura del sistema periódico y estados fundamentales de los elementos. Por fin, estudia el espín nuclear y la interacción hiperfina, el láser, métodos modernos de espectroscopía óptica y enlace químico.

Resumiendo, nos encontramos ante un muy buen libro de física atómica que incluye los principales avances del campo y todo ello con un lenguaje fácil y muy asequible. La inclusión de dispositivos, diagramas, aparatos y montajes experimentales es constante y constituye una aportación notable. (C. P.)

Apuntes

¿Venganza del dios de la lluvia?

Chac, dios de la lluvia en la mitología maya, no dejó de proteger a su pueblo con precipitaciones períodicas desde que emergió esa cultura hace unos 3000 años hasta su colapso final en torno al siglo nono de nuestra era. Se afirmaba sin excesiva fe, o al menos sin pruebas suficientes, que un drástico cambio climático aceleró el hundimiento maya. Del estudio palinológico no se sacaba ninguna conclusión segura, porque el hombre había deforestado zonas extensas, clareos que podrían atribuirse también a factores meteorológicos. Pero la investigación de las variaciones de los isótopos de oxígeno en testigos extraídos del lago de Chichancanab ha terminado por revelar que entre el año 800 y el 1000 se produjo el período más seco del Holoceno tardío, que coincidió con el derrumbe maya.

En busca del origen

A diferencia de lo que ocurre con las purinas, las vías propuestas para obtener la síntesis prebiótica de las pirimidinas a partir de sus precursores no acaban de rendir los resultados esperados. El maleficio podría romperse con un nuevo método, que trabaja en soluciones de urea concentrada, una situación parecida a la que se daría en lagunas y estanques de la Tierra primitiva. En dicha solución, el cianoacteoaldehído reacciona para formar citosina y, a partir de ésta, uracilo por hidrolisis. ¿Empezó así el mundo de ARN?

Sólo una vida

Los patógenos bacterianos son, en su mayoría, altamente específicos. Hay algunos, sin embargo, que pueden infectar por igual a plantas y animales, pese a la sustancial diferencia entre aquéllas y éstos. Ocurre así con *Pseudomonas aeruginosa*, que ataca las hojas de *Arabidopsis thaliana* y la piel del ratón. Patogenicidad que se atempera provocando la mutación de tres genes de ambos organismos pluricelulares.

Azul galáctico



Los psiquiatras no son los únicos preocupados por la normalidad. En su esfuerzo por conocer la estructura global del universo, los astrónomos intentan descifrar una nueva imagen del *Telescopio Espacial Hubble* (*izquierda*), que ofrece una prueba contundente de que las galaxias brillantes de forma elíptica o espiral —como nuestra propia Vía Láctea— constituyen una minoría marginal en el universo. Lo habitual son los objetos azules irregulares.

Rogier Windhorst dirigió el equipo que tomó esta imagen de las misteriosas “galaxias azules tenues”. Su color indica que en ellas abundan las estrellas jóvenes y calientes; la forma irregular sugiere, en algunos casos, que las galaxias son muy dinámicas, y chocan e interactúan unas con otras. Además, suelen abundar a distancias de tres a ocho mil millones de años, correspondientes a una época en que el universo tenía alrededor de la mitad de su edad actual. Esas estructuras azules tenues parecen haber desaparecido casi por completo en el presente. ¿Se autodestruyeron o, simplemente, se desvanecieron? Las observaciones con telescopios gigantes en tierra que están ahora en marcha habrán de contarnos la vida de las galaxias “normales”.

Corey S. Powell

Sabor marino

Durante el Mioceno tardío, hace unos 8 o 10 millones de años, el mar anegaba buena parte del continente sudamericano, razón por la cual se han podido recuperar fósiles oceánicos. Prolongando la inundación se abrió paso una lengua de mar que introdujo especies en el sistema fluvial del Amazonas. Algunas se acomodaron y, tras las adaptaciones oportunas, se asentaron en el agua dulce.

¿Campos u ondas?

No había forma de respaldar con la observación los mecanismos sugeridos para explicar los millones de grados a que se halla el gas de la corona solar, temperatura muy superior a la de la fotosfera subyacente. Tal vez lo consiga el *Telescopio de rayos X blandos*. Sabido es que el campo magnético de la corona organiza el plasma en bucles, los elementos estructurales básicos de esa región solar. Tras el estudio de 47 bucles coronales se llega a la conclusión de que la presión y tasa de latencia de los mismos guardan relación con la longitud. La relación de escala resultante abona la hipótesis de que la fuente térmica de energía se disipa por intensos campos magnéticos y no por las ondas que genera el movimiento turbulento de la fotosfera.